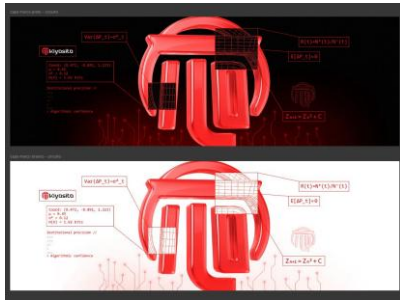




Filtragem Quântica de Kalman: Uma Estrutura Unificadora para Estimação em Tempo Real e Controle de Sistemas Quânticos Ruidosos

Autor(es):

Marcos Eduardo Elias

Holosystems Quantum Algorithms; EquiVerse AI; Instituto Ramanujan; Polymath Chronicles LLC

São Paulo, Brasil

Email: marcos@holosystems.com.br

Sobre o Autor

Marcos Eduardo Elias é engenheiro, matemático e programador, com trajetória marcada pela interseção entre ciência fundamental e aplicação prática em sistemas de alta complexidade. Formado em Engenharia Mecânica e Engenharia Eletrônica pela Escola Politécnica da USP, possui ainda três doutorados — dois em Matemática e um em Computação.

É fundador e arquiteto da **Kiyosito Deep Tech Ventures**, estrutura que abriga e integra iniciativas como a **Holosystems Quantum Algorithms**, dedicada ao desenvolvimento de algoritmos quânticos em ambientes NISQ; a **EquiVerse AI**, voltada à inteligência artificial não antropocêntrica aplicada a apostas esportivas, biotecnologia e bem-estar animal; e o **Instituto Ramanujan**, voltado à formação de jovens prodígios em matemática e à difusão de conhecimento avançado.

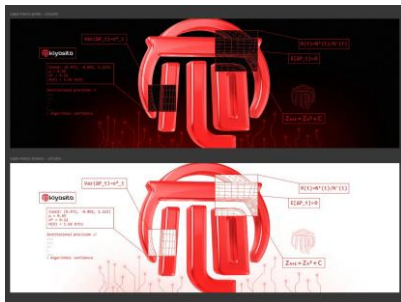
Ao longo de sua carreira, Elias desenvolveu algoritmos originais que dialogam com tradições matemáticas clássicas e contemporâneas — de Kolmogorov a Itô, de Mandelbrot a Taleb — buscando expandir os limites do cálculo estocástico, da

Kiyosito maintains its settlement and fiduciary service structure for international operations through RF Bank & Trust (Cayman) Limited, a financial institution licensed by the Cayman Islands Monetary Authority (Category A License).

International Banking Address

RF Bank & Trust (Cayman) Limited
3rd Floor, Fidelity Financial Centre
1 Gecko Link, Grand Cayman, KY1-1103, Cayman Islands
Tel.: +1 (345) 746-6010
Fax: +1 (345) 949-6064

Note: This address refers exclusively to the banking and fiduciary service structure contracted by Kiyosito and does not constitute its corporate or administrative headquarters.



modelagem fractal e da lógica fuzzy em aplicações que vão da engenharia financeira à física quântica. É também trader profissional com mais de 30 anos de experiência em mercados globais, criador do sistema **Julia Mandelbrot**, com mais de 1,2 milhão de linhas de código, que integra geometria fractal, lógica fuzzy e estruturas de payoff inspiradas em Edward Thorp.

Introdução: Da Fusão de Dados Clássica à Estimação Quântica - Uma Jornada através do Filtro de Kalman

A estimação de estados em sistemas dinâmicos sob incerteza constitui um dos problemas fundamentais da teoria de controle moderna. No cerne desta desafiadora questão reside o **Filtro de Kalman** - uma conquista matemática que transcendeu seu domínio original para se tornar pedra angular da engenharia de sistemas contemporânea. Formulado por Rudolf Emil Kálmán em 1960, este algoritmo revolucionário resolveu elegantemente o problema da **estimação ótima de estados** em sistemas dinâmicos lineares sujeitos a ruído gaussiano, estabelecendo-se como paradigma dominante em aplicações que demandam fusão de dados em tempo real.

Matematicamente, o Filtro de Kalman convencional opera sob o framework de espaço de estados:

text

$$x_k = F x_{k-1} + B u_k + w_k$$

$$z_k = H x_k + v_k$$

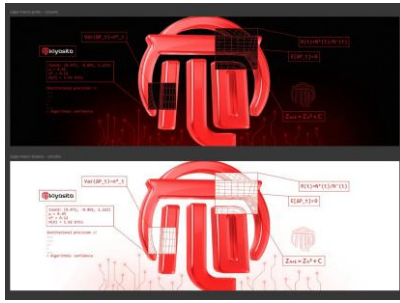
onde $x_k \in \mathbb{R}^n$ representa o estado do sistema, $z_k \in \mathbb{R}^m$ as medições, com $w_k \sim N(0, Q)$ e $v_k \sim N(0, R)$ sendo processos de ruído gaussianos independentes. A solução ótima de estimação é dada recursivamente pelas equações de predição e correção:

Kiyosito maintains its settlement and fiduciary service structure for international operations through RF Bank & Trust (Cayman) Limited, a financial institution licensed by the Cayman Islands Monetary Authority (Category A License).

International Banking Address

RF Bank & Trust (Cayman) Limited
3rd Floor, Fidelity Financial Centre
1 Gecko Link, Grand Cayman, KY1-1103, Cayman Islands
Tel.: +1 (345) 746-6010
Fax: +1 (345) 949-6064

Note: This address refers exclusively to the banking and fiduciary service structure contracted by Kiyosito and does not constitute its corporate or administrative headquarters.



text

$$P_{\{k|k-1\}} = F P_{\{k-1|k-1\}} F^T + Q$$

$$K_k = P_{\{k|k-1\}} H^T (H P_{\{k|k-1\}} H^T + R)^{-1}$$

$$\hat{x}_{\{k|k\}} = \hat{x}_{\{k|k-1\}} + K_k (z_k - H \hat{x}_{\{k|k-1\}})$$

$$P_{\{k|k\}} = (I - K_k H) P_{\{k|k-1\}}$$

Esta formulação elegante permitiu aplicações transformative em navegação, controle aerospace, robótica e incontáveis outros domínios onde a fusão de dados de múltiplos sensores é essencial.

Contudo, o advento da **era quântica** introduziu desafios fundamentalmente novos. Sistemas quânticos, governados pelas leis da mecânica quântica, apresentam características distintivas que invalidam pressupostos clássicos: **não-comutatividade** de operadores, **back-action** de medição, e **decoerência** emergem como fenômenos intrínsecos que demandam uma reformulação completa do problema de estimação.

Este artigo apresenta uma generalização quântica abrangente do Filtro de Kalman - o **Filtro de Kalman Quântico (FKQ)** - que incorpora rigorosamente as peculiaridades da mecânica quântica enquanto mantém a estrutura recursiva computacionalmente eficiente de seu predecessor clássico. Desenvolvemos um framework unificado que abrange desde sistemas gaussianos lineares (tratáveis exatamente) até sistemas não-lineares como qubits (requerendo extensões do tipo EKF/UKF), sempre garantindo **realizabilidade física** através das restrições:

text

$$P + (i/2)\theta \geq 0$$

$$A\theta + \theta A^T + BJB^T = 0$$

onde θ é a matriz de comutação fundamental.

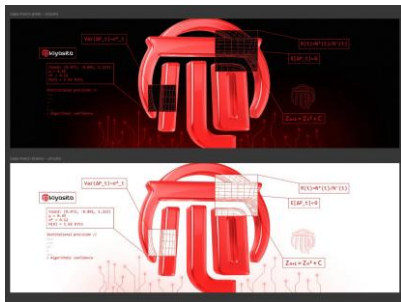
Nossa contribuição principal reside na derivação autoconsistente das equações do FKQ para medição contínua, sua discretização fisicamente meaningful, e

Kiyosito maintains its settlement and fiduciary service structure for international operations through RF Bank & Trust (Cayman) Limited, a financial institution licensed by the Cayman Islands Monetary Authority (Category A License).

International Banking Address

RF Bank & Trust (Cayman) Limited
3rd Floor, Fidelity Financial Centre
1 Gecko Link, Grand Cayman, KY1-1103, Cayman Islands
Tel.: +1 (345) 746-6010
Fax: +1 (345) 949-6064

Note: This address refers exclusively to the banking and fiduciary service structure contracted by Kiyosito and does not constitute its corporate or administrative headquarters.



aplicação a problemas concretos de controle quântico em tempo real. Demonstramos como este framework possibilita **estabilização ativa, mitigação de decoerência**, e **controle de feedback** de sistemas quânticos, abrindo caminho para aplicações práticas na era NISQ e além.

SEÇÃO 2: FUNDAMENTOS DO FILTRO DE KALMAN CLÁSSICO

Fusão (Correção de Kalman): O Filtro de Kalman é o navegador inteligente dentro do seu app que faz o seguinte:

Pesa a confiabilidade da sua predição (certeza de P) versus a confiabilidade do GPS (erro de R).

Se o sinal do GPS estiver fraco (R é alto), ele confia mais no modelo e no seu último estado conhecido.

Se o carro entrar em uma área com GPS de precisão (R é baixo), ele confia mais no GPS para corrigir o modelo.

O resultado final é uma estimativa de posição muito mais suave e precisa do que usar apenas o modelo ou apenas o GPS.

A história de Rudolf Kalman e a gênese do seu filtro é um capítulo fascinante da engenharia e matemática do século XX.

Rudolf Emil Kálmán (19 de maio de 1930 – 2 de julho de 2016) foi um engenheiro elétrico, matemático e inventor húngaro-americano. É amplamente considerado uma das figuras mais importantes em teoria de sistemas e controle do século XX.

Formação: Obteve seu diploma de bacharel e mestre em engenharia elétrica pelo MIT (1953) e seu doutorado pela Universidade de Columbia (1957).

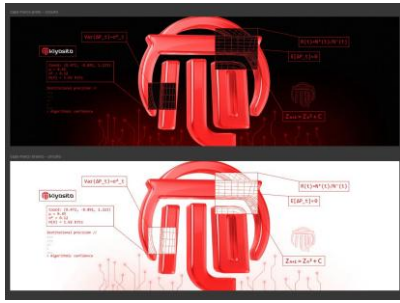
Trabalho Seminal: Em 1960, enquanto pesquisava no Research Institute for Advanced Study (RIAS) em Baltimore, ele publicou seu artigo mais famoso: "A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems".

Kiyosito maintains its settlement and fiduciary service structure for international operations through RF Bank & Trust (Cayman) Limited, a financial institution licensed by the Cayman Islands Monetary Authority (Category A License).

International Banking Address

RF Bank & Trust (Cayman) Limited
3rd Floor, Fidelity Financial Centre
1 Gecko Link, Grand Cayman, KY1-1103, Cayman Islands
Tel.: +1 (345) 746-6010
Fax: +1 (345) 949-6064

Note: This address refers exclusively to the banking and fiduciary service structure contracted by Kiyosito and does not constitute its corporate or administrative headquarters.



Reconhecimento: Sua contribuição foi tão revolucionária que lhe rendeu algumas das mais altas honrarias científicas, incluindo a Medalha Nacional de Ciência dos EUA (2009) e a Medalha Charles Stark Draper (2008), considerada o "Prêmio Nobel da Engenharia".

Apesar de sua imensa contribuição, o valor do Filtro de Kalman não foi imediatamente reconhecido. Conta-se que quando ele primeiro apresentou seu trabalho a um grupo de engenheiros, a reação foi de ceticismo. Somente quando Stanley Schmidt do NASA Ames Research Center o aplicou com sucesso no programa Apollo é que o filtro ganhou widespread adoption.

Para qual problema ele criou o Filtro?

Kalman estava tentando resolver um problema matemático fundamental na teoria de controle e estimativa:

O Problema da Estimação Ótima de Estados em Sistemas Dinâmicos com Ruído.

Na época, já existiam filtros para extrair sinais de ruído (como o Filtro de Wiener), mas eles tinham limitações sérias:

Eram projetados para sistemas estacionários (cujas propriedades não mudam com o tempo).

Eram formulados no domínio da frequência, o que os tornava complexos de implementar computacionalmente.

Eram não-recursivos: para processar um novo dado, todo o cálculo tinha que ser refeito desde o início, o que era impraticável para sistemas em tempo real.

Kalman revolucionou o campo ao:

Formular o problema no domínio do tempo.

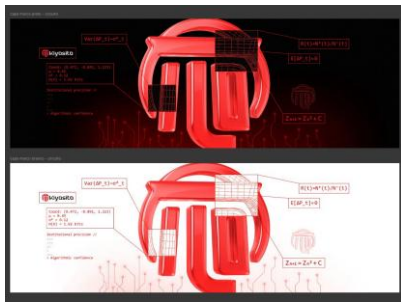
Tornar o algoritmo recursivo, processando uma medição por vez e descartando dados antigos (tornando-o perfeito para computadores digitais).

Kiyosito maintains its settlement and fiduciary service structure for international operations through RF Bank & Trust (Cayman) Limited, a financial institution licensed by the Cayman Islands Monetary Authority (Category A License).

International Banking Address

RF Bank & Trust (Cayman) Limited
3rd Floor, Fidelity Financial Centre
1 Gecko Link, Grand Cayman, KY1-1103, Cayman Islands
Tel.: +1 (345) 746-6010
Fax: +1 (345) 949-6064

Note: This address refers exclusively to the banking and fiduciary service structure contracted by Kiyosito and does not constitute its corporate or administrative headquarters.



Generalizá-lo para sistemas não-estacionários (que mudam com o tempo).
Fornecer uma solução ótima (sob certas condições) para a estimativa do estado de um sistema.

O problema central que ele resolveu foi: "Dado um modelo matemático de como um sistema evolui (com incerteza) e uma série de medições ruidosas desse sistema, qual é a melhor estimativa possível do seu estado interno atual e futuro?"

Seu trabalho foi inicialmente impulsionado por aplicações em voo e controle de mísseis, onde era crucial prever trajetórias com precisão a partir de dados sensoriais imperfeitos.

É algo muito usado em eletrônica? Correto!

Absolutamente. É difícil exagerar a ubiquidade do Filtro de Kalman na eletrônica moderna e em sistemas embarcados. Praticamente qualquer dispositivo que precise estimar uma quantidade não medida diretamente ou fusionar dados de múltiplos sensores provavelmente usa uma variação do Filtro de Kalman.

Aqui estão alguns exemplos concretíssimos de aplicação em eletrônica:

Sistemas de Navegação e GPS:

Seu smartphone e seu GPS de carro usam um Filtro de Kalman (frequentemente em sua versão não-linear, o Extended Kalman Filter - EKF) para fusionar dados do acelerômetro, giroscópio, magnetômetro e do sinal de satélite GPS. O resultado é uma estimativa suave e precisa da sua posição, velocidade e orientação, mesmo quando o sinal do GPS falha momentaneamente em um túnel.

Robótica e Veículos Autônomos:

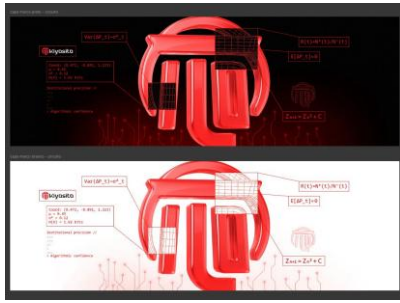
Um robô aspirador ou um carro autônomo usa o filtro para estimar sua posição no ambiente (localização) e a posição de objetos ao seu redor (mapeamento), combinando dados de odometria (contagem das rodas), sensores LIDAR, câmeras

Kiyosito maintains its settlement and fiduciary service structure for international operations through RF Bank & Trust (Cayman) Limited, a financial institution licensed by the Cayman Islands Monetary Authority (Category A License).

International Banking Address

RF Bank & Trust (Cayman) Limited
3rd Floor, Fidelity Financial Centre
1 Gecko Link, Grand Cayman, KY1-1103, Cayman Islands
Tel.: +1 (345) 746-6010
Fax: +1 (345) 949-6064

Note: This address refers exclusively to the banking and fiduciary service structure contracted by Kiyosito and does not constitute its corporate or administrative headquarters.



e radar. Este problema é tão central que é conhecido como SLAM (Simultaneous Localization and Mapping), e o Kalman Filter é uma de suas soluções clássicas.

Eletrônica de Consumo:

Estabilização de imagem em câmeras e smartphones: o filtro é usado para prever o movimento da mão e mover a lente ou processar a imagem digitalmente para compensar esse movimento, resultando em fotos e vídeos não tremidas.

Economia de Bateria: Em dispositivos com GPS, usar apenas o chip GPS é caro energeticamente. O filtro permite "adivinhar" a posição entre uma atualização e outra do GPS, permitindo que o chip fique desligado por mais tempo, economizando bateria.

Engenharia Aeroespacial:

Foi sua aplicação mais famosa inicialmente. O Filtro de Kalman foi crucial para o programa Apollo da NASA, guiando a nave até a Lua e de volta, calculando trajetórias ótimas com dados limitados e ruidosos. Até hoje é usado em satélites, foguetes e estações espaciais.

Processamento de Sinais:

Em telecomunicações, para limpar sinais ruidosos e para rastrear e sincronizar a fase e a frequência de portadoras em receptores.

Biomedicina:

Para filtrar ruído de sinais fisiológicos como ECG (coração) e EEG (cérebro), permitindo um diagnóstico mais claro.

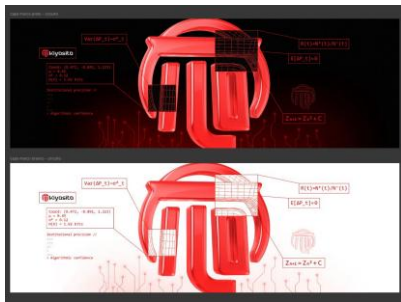
Em resumo - muito diferentemente de mim 🤪🤪🤪 - Rudolf Kalman foi um gênio matemático que resolveu um problema fundamental de estimativa. Sua criação, o Filtro de Kalman, transcendeu o campo teórico e se tornou um componente algorítmico essencial em praticamente toda a eletrônica moderna que envolve sensores, movimento e navegação, sendo um pilar invisível, porém indispensável, da tecnologia do século XXI.

Kiyosito maintains its settlement and fiduciary service structure for international operations through RF Bank & Trust (Cayman) Limited, a financial institution licensed by the Cayman Islands Monetary Authority (Category A License).

International Banking Address

RF Bank & Trust (Cayman) Limited
3rd Floor, Fidelity Financial Centre
1 Gecko Link, Grand Cayman, KY1-1103, Cayman Islands
Tel.: +1 (345) 746-6010
Fax: +1 (345) 949-6064

Note: This address refers exclusively to the banking and fiduciary service structure contracted by Kiyosito and does not constitute its corporate or administrative headquarters.



O Filtro de Kalman é um "algoritmo de infraestrutura". Ele é tão fundamental que se tornou parte do alicerce de inúmeras indústrias. Cobrar royalties por seu uso seria como tentar cobrar royalties pela própria Lei de Ohm ou pelo Teorema de Pitágoras. Ele está embutido em:

Bilhões de smartphones.

Todos os veículos modernos com GPS e sistemas de estabilidade.

Todos os aviões comerciais e sistemas de controle de tráfego aéreo.

Sistemas de mísseis e defesa de inúmeras nações.

Satélites e naves espaciais.

Inúmeros produtos industriais e robóticos.

O volume de produtos que o utilizam é da ordem de dezenas de bilhões de unidades ao longo das décadas.

Se fosse patenteado, o modelo de licenciamento provavelmente não seria por um valor por smartphone, por exemplo, pois isso tornaria o custo proibitivo. Seria mais provável um licenciamento por chipset (para fabricantes de semicondutores como Qualcomm, Broadcom, Intel) ou por implementação (para empresas como Google, Apple, Tesla, Boeing, Lockheed Martin). Mesmo com uma taxa de licenciamento ínfima por unidade (digamos, \$0.01), o volume colossal de dispositivos renderia centenas de milhões a bilhões de dólares anuais apenas em royalties. Uma patente com essa abrangência seria um ativo estratégico de segurança nacional.

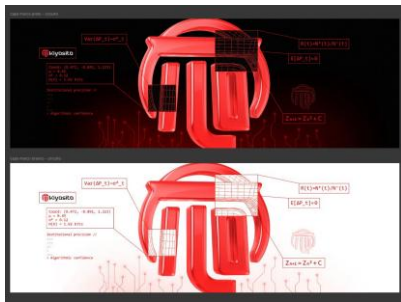
Rudolf Kalman desenvolveu e publicou o algoritmo em seu artigo seminal de 1960, "A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems", no Journal of Basic Engineering. Crucialmente, ele não patenteou a ideia. O trabalho foi divulgado como ciência pura e aberta—um presente para a comunidade acadêmica e de engenharia mundial. Na época, e especialmente em um ambiente de pesquisa acadêmica como o Research Institute for Advanced Study (RIAS), a cultura era

Kiyosito maintains its settlement and fiduciary service structure for international operations through RF Bank & Trust (Cayman) Limited, a financial institution licensed by the Cayman Islands Monetary Authority (Category A License).

International Banking Address

RF Bank & Trust (Cayman) Limited
3rd Floor, Fidelity Financial Centre
1 Gecko Link, Grand Cayman, KY1-1103, Cayman Islands
Tel.: +1 (345) 746-6010
Fax: +1 (345) 949-6064

Note: This address refers exclusively to the banking and fiduciary service structure contracted by Kiyosito and does not constitute its corporate or administrative headquarters.



muito mais focada na publicação e no avanço do conhecimento do que na comercialização via patentes.

SEÇÃO 3: TRANSIÇÃO PARA O DOMÍNIO QUÂNTICO

A instabilidade dos hardware quânticos atuais é um problema profundo e multifacetado, que surge da tentativa de controlar o mundo quântico de acordo com as regras do nosso mundo clássico. (estou introduzindo nosso assunto aqui, ou seja, não mudei de tema aleatoriamente - por favor, tenha paciência - e siga me acompanhando aqui)

O Inimigo Fundamental: A Decoerência Quântica

Este é o conceito mais importante. Para entender a instabilidade, primeiro precisamos entender o que é um qubit e o que é coerência.

O Qubit: Diferente de um bit clássico (0 ou 1), um qubit existe em um estado de superposição, uma combinação de $|0\rangle$ e $|1\rangle$. Essa superposição é um estado quântico frágil e delicado.

Coerência: É a propriedade que permite ao qubit manter essa superposição.

Enquanto coerente, o qubit pode realizar cálculos.

Decoerência: É o processo pelo qual um qubit perde sua coerência e entra em colapso para um estado clássico (0 ou 1). É como uma vela em um ambiente ventoso: o vento (o ambiente) apaga a chama (a superposição).

Por que a decoerência acontece? Um sistema quântico não está isolado. El...

Os Desafios de Engenharia por Tipo de Qubit

Diferentes plataformas quânticas (supercondutores, íons aprisionados, etc.) têm fontes de instabilidade específicas. Vamos focar nos dois mais comuns:

a) Qubits Supercondutores (IBM, Google, Rigetti)

Estes são circuitos elétricos microscópicos resfriados a temperaturas ultra-baixas.

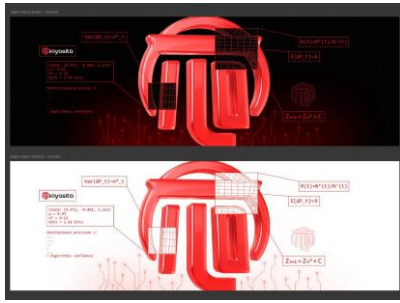
Fonte de Instabilidade Principal:

Kiyosito maintains its settlement and fiduciary service structure for international operations through RF Bank & Trust (Cayman) Limited, a financial institution licensed by the Cayman Islands Monetary Authority (Category A License).

International Banking Address

RF Bank & Trust (Cayman) Limited
3rd Floor, Fidelity Financial Centre
1 Gecko Link, Grand Cayman, KY1-1103, Cayman Islands
Tel.: +1 (345) 746-6010
Fax: +1 (345) 949-6064

Note: This address refers exclusively to the banking and fiduciary service structure contracted by Kiyosito and does not constitute its corporate or administrative headquarters.



Ruído e Fônons: Mesmo dentro de um refrigerador de diluição, que chega a ~15 milikelvins (mais frio que o espaço sideral), ainda existem fônons (vibrações quânticas) residuais. Esses fônons podem excitar o qubit, fazendo-o perder energia e decair do estado $|1\rangle$ para o $|0\rangle$ (um tipo de decoerência, tempo T_1).

Flutuações de Fase: Campos magnéticos ou elétricos minúsculos e flutuantes podem desviar a frequên...

Qubits de Íons Aprisionados (IonQ, Honeywell)

Estes usam átomos individuais (íons) suspensos no vácuo por campos eletromagnéticos.

Fonte de Instabilidade Principal:

Flutuações de Campo: Qualquer flutuação mínima no campo magnético ou elétrico usado para aprisionar os íons pode perturbá-los, aquecendo o sistema e introduzindo erros.

Pressão Residual: Mesmo no ultra-alto vácuo, existem algumas moléculas de gás residual. Uma colisão de um íon com uma dessas moléculas pode ejetá-lo da armadilha, destruindo o qubit completamente.

Desafios de Controle:

Velocidade de Operação: As portas lógicas entre íons são realizadas com lasers. Alinhar e controlar esses lasers com a precisão necessária é complexo e tende a ser mais lento do que em qubits supercondutores.

Escalabilidade e o Problema da Calibração

Efeitos de Crosstalk: À medida que se adicionam mais qubits, eles começam a interferir uns com os outros. O campo magnético de um qubit pode afetar seu vizinho. Isolar qubits o suficiente para controlá-los individualmente, mas acoplá-los o suficiente para fazer operações em multi-qubits, é um ato de equilíbrio extremamente difícil.

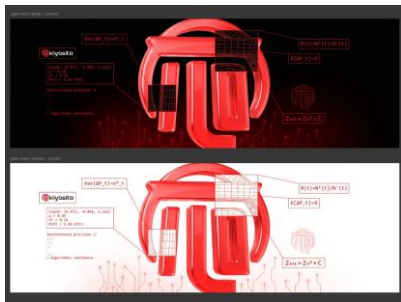
Calibração Contínua: Os parâmetros dos qubits (como sua frequência de ressonância) mudam com o tempo devido a pequenas mudanças no ambiente.

Kiyosito maintains its settlement and fiduciary service structure for international operations through RF Bank & Trust (Cayman) Limited, a financial institution licensed by the Cayman Islands Monetary Authority (Category A License).

International Banking Address

RF Bank & Trust (Cayman) Limited
3rd Floor, Fidelity Financial Centre
1 Gecko Link, Grand Cayman, KY1-1103, Cayman Islands
Tel.: +1 (345) 746-6010
Fax: +1 (345) 949-6064

Note: This address refers exclusively to the banking and fiduciary service structure contracted by Kiyosito and does not constitute its corporate or administrative headquarters.



Portanto, os computadores quânticos precisam passar por longos e frequentes processos de calibração automática para se manterem operacionais, muitas vezes antes de cada execução de um circuito. É um sistema intrinsecamente instável.

O Resultado: A Era NISQ

A combinação de todos esses fatores – decoerência rápida, erros de controle e dificuldade de escalonamento – nos coloca na chamada Era NISQ (Noisy Intermediate-Scale Quantum).

Os computadores quânticos atuais são:

Ruidosos (Noisy): Dominados por erros.

De Escala Intermediária (Intermediate-Scale): Possuem de algumas dezenas a algumas centenas de qubits.

Não é possível fazer Correção de Erros Quânticos (QEC): Para implementar QEC e criar um qubit lógico estável, são necessários milhares de qubits físicos.

Em resumo, a instabilidade dos hardwares quânticos hoje é uma consequência direta da luta para preservar e controlar estados quânticos frágeis em um ambiente clássico que constantemente tenta destruí-los através da decoerência. Supera...

As Consequências Práticas da Instabilidade: A Ditadura do Erro

A instabilidade fundamental dos qubits se manifesta de formas muito concretas que limitam drasticamente o que os computadores quânticos atuais podem fazer:

Profundidade de Circuito Limitada: O Tempo de Coerência (T_2) define uma "janela de tempo" na qual os cálculos devem ser concluídos. Cada porta lógica leva um tempo para ser executada (geralmente nanossegundos). Portanto, existe um número máximo de operações sequenciais (a profundidade do circuito) que podem ser realizadas antes que a decoerência destrua a informação. Um circuito muito longo se torna uma bagunça incoerente antes de terminar.

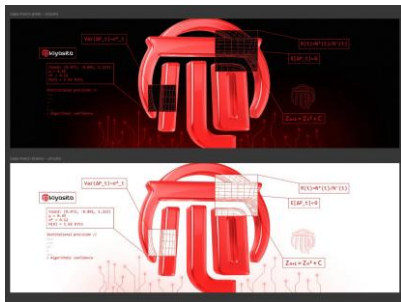
Fidelidade das Operações: Nenhuma operação é perfeita. A fidelidade de uma

Kiyosito maintains its settlement and fiduciary service structure for international operations through RF Bank & Trust (Cayman) Limited, a financial institution licensed by the Cayman Islands Monetary Authority (Category A License).

International Banking Address

RF Bank & Trust (Cayman) Limited
3rd Floor, Fidelity Financial Centre
1 Gecko Link, Grand Cayman, KY1-1103, Cayman Islands
Tel.: +1 (345) 746-6010
Fax: +1 (345) 949-6064

Note: This address refers exclusively to the banking and fiduciary service structure contracted by Kiyosito and does not constitute its corporate or administrative headquarters.



porta quântica mede a probabilidade de ela executar a operação exata pretendida. Em sistemas atuais, as fidelidades das portas de 1 qubit estão em ~99.9%, e as de 2 qubits (que são mais complexas e lentas) estão em ~99.5% ou menos. Parece alto, mas:

Para um circuito com 100 portas de 2 qubits, a fidelidade total esperada seria $0.995^{100} \approx 0.60$. Ou seja, há apenas 60% de chance de o circuito executar corretamente. Para 1000 portas, essa probabilidade cai para quase zero. Resultados Probabilísticos e Ruidosos: Como as operações são imperfeitas, a leitura final de um cálculo quântico não é limpa. Se o resultado correto para um problema fosse o estado $|1011\rangle$, o hardware retornaria uma distribuição de probabilidade onde $|1011\rangle$ é apenas o estado mais provável, mas outros estados incorretos (como $|1010\rangle$, $|1111\rangle$, etc.) também aparecem com probabilidade significativa. O desafio é distinguir o sinal (a resposta correta) do ruído.

A Ilusão da "Vantagem Quântica"

Termos como "supremacia quântica" ou "vantagem quântica" (usados pela Google em 2019) podem criar a impressão errada de que esses dispositivos são estáveis e úteis. Na realidade, esses marcos foram atingidos de uma forma muito específica: Eles envolveram tarefas altamente especializadas criadas especificamente para ser impossíveis para supercomputadores clássicos, mas sem aplicação prática direta (como amostragem de circuitos quânticos aleatórios).

Esses experimentos foram possíveis apenas através de uma calibração extrema e contínua dos qubits e de um design de circuito que opera dentro da janela de coerência extremamente apertada.

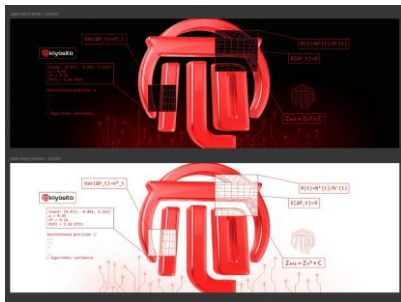
É uma demonstração de potencial, não de utilidade prática corrente.

Kiyosito maintains its settlement and fiduciary service structure for international operations through RF Bank & Trust (Cayman) Limited, a financial institution licensed by the Cayman Islands Monetary Authority (Category A License).

International Banking Address

RF Bank & Trust (Cayman) Limited
3rd Floor, Fidelity Financial Centre
1 Gecko Link, Grand Cayman, KY1-1103, Cayman Islands
Tel.: +1 (345) 746-6010
Fax: +1 (345) 949-6064

Note: This address refers exclusively to the banking and fiduciary service structure contracted by Kiyosito and does not constitute its corporate or administrative headquarters.



SEÇÃO 4: FUNDAMENTOS DA FILTRAGEM QUÂNTICA

O Caminho para a Estabilidade: Correção de Erros Quânticos (QEC)

A solução de longo prazo para a instabilidade não é eliminar o ruído (impossível), mas proteger a informação dele. Isso é feito através da Correção de Erros Quânticos (QEC).

A QEC é radicalmente diferente da correção de erro clássica:

Redundância: A informação de 1 qubit lógico (o qubit estável e perfeito que queremos) é codificada no estado entrelaçado de muitos qubits físicos (os qubits instáveis que temos).

Medição de Síndrome: Em vez de medir os qubits físicos diretamente (o que colapsaria a informação), mede-se síndromes de erro – informações sobre se um erro ocorreu e que tipo de erro foi (e.g., "um flip de bit aconteceu em um desses qubits, mas não sei em qual"), sem revelar o estado pro...

O Estado da Arte

Os hardwares quânticos atuais são laboratórios de pesquisa incrivelmente complexos e caros, não produtos comerciais robustos. Sua instabilidade é uma propriedade intrínseca da luta para controlar a mecânica quântica em escala macroscópica.

O caminho à frente é claro, mas desafiador:

Melhorar os qubits físicos: Aumentar os tempos de coerência (T_1 , T_2) e a fidelidade das portas através de melhorias em materiais, controle e design.

Desenvolver arquiteturas tolerantes a falhas: Projetar sistemas que possam operar de forma útil mesmo com uma certa taxa de erro inerente (era NISQ).

Implementar a Correção de Erros Quânticos: Este é o Santo Graal. Somente com a QEC em larga escala poderemos finalmente domar a instabilidade e liberar todo o potencial da computação quântica para problemas práticos e transformadores.

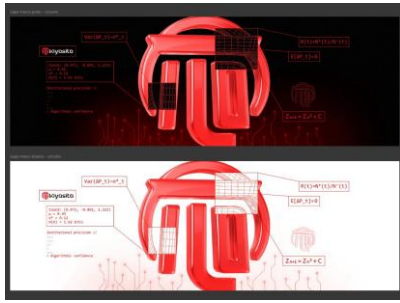
A instabilidade não é um defeito de projeto; é a manifestação da fronteira física

Kiyosito maintains its settlement and fiduciary service structure for international operations through RF Bank & Trust (Cayman) Limited, a financial institution licensed by the Cayman Islands Monetary Authority (Category A License).

International Banking Address

RF Bank & Trust (Cayman) Limited
3rd Floor, Fidelity Financial Centre
1 Gecko Link, Grand Cayman, KY1-1103, Cayman Islands
Tel.: +1 (345) 746-6010
Fax: +1 (345) 949-6064

Note: This address refers exclusively to the banking and fiduciary service structure contracted by Kiyosito and does not constitute its corporate or administrative headquarters.



que estamos tentando cruzar. Cada pequeno avanço em estabilidade é uma conquista monumental.

Como ainda não temos correção de erros quântica completa, os pesquisadores desenvolveram uma série de técnicas para "conviver" com o ruído e extrair resultados úteis dos dispositivos atuais. Este campo é conhecido como mitigação de erros.

Pré-Processamento (Compilation):

Mapeamento Qubit: Algoritmos que mapeiam o circuito lógico de um programa para a topologia física do hardware, minimizando o número de operações de comunicação de longa distância (que são mais propensas a erros).

Transpilation: Converter portas lógicas universais em portas nativas suportadas pelo hardware específico, otimizando a profundidade e a duração do circuito.

Pós-Processamento (Mitigação de Erros Propriamente Dita):

Mitigação de Ruído de Leitura (Readout Error Mitigation): Mede-se a ...

A Busca por Qubits Melhores: Plataformas Alternativas

Enquanto a IBM e a Google refinam os qubits supercondutores, outras empresas e laboratórios apostam em plataformas físicas diferentes que podem ser intrinsecamente mais estáveis:

Qubits de Íons Aprisionados (IonQ, Honeywell): Como mencionado, íons individuais são aprisionados no vácuo. Sua grande vantagem é que todos os íons são idênticos (não há variação de fabricação) e seus tempos de coerência podem ser muito longos (até segundos). O desafio é tornar as operações entre íons mais rápidas e escalar o sistema para centenas de íons.

Qubits de Átomos Neutros (ColdQuanta, Pasqal): Usam átomos neutros presos por feixes de laser ("pinças ópticas"). Permitem que os qubits sejam rearranjados dinamicamente no esp...

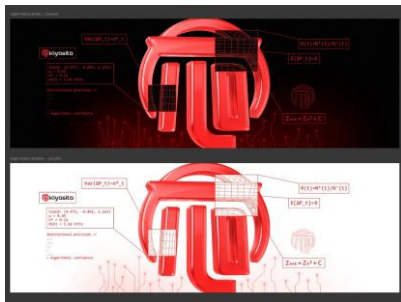
mas, porém, entretanto, todavia, não obstante...

Kiyosito maintains its settlement and fiduciary service structure for international operations through RF Bank & Trust (Cayman) Limited, a financial institution licensed by the Cayman Islands Monetary Authority (Category A License).

International Banking Address

RF Bank & Trust (Cayman) Limited
3rd Floor, Fidelity Financial Centre
1 Gecko Link, Grand Cayman, KY1-1103, Cayman Islands
Tel.: +1 (345) 746-6010
Fax: +1 (345) 949-6064

Note: This address refers exclusively to the banking and fiduciary service structure contracted by Kiyosito and does not constitute its corporate or administrative headquarters.



eu, que não sou besta de me meter em hardware (e ponto!) - quanto mais hardware quântico! - pensei assim...

vou focar no algoritmo para estabilizar o hardware "zuado"

e então...

pensei assim... será que os computadores clássicos ainda não são uma ferramenta vital para o desenvolvimento da computação quântica?

Simulação de Circuitos Quânticos: Para dispositivos com até ~50 qubits, supercomputadores clássicos podem simular perfeitamente seu comportamento, servindo como um "oráculo" para verificar se o hardware quântico real está funcionando corretamente.

Emulação Ruidosa: Para dispositivos maiores, podemos usar técnicas clássicas avançadas (como Tensor Networks) para emular o comportamento de um computador quântico ruidoso. Isso permite que os desenvolvedores testem e depurem seus algoritmos em um ambiente que imita as imperfeições do hardware real, antes de gastar tempo precioso de acesso ao quantum computer.

Aí voltei a pensar em KALMAN! Ah, Rudolf Emil Kalman...

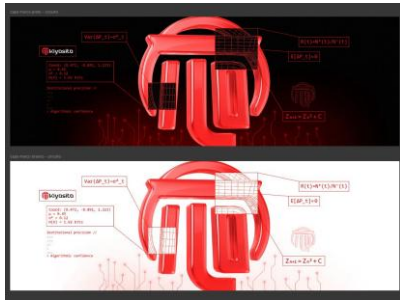
Quando Kalman apresentou suas ideias sobre filtragem dinâmica e espaço de estados, foi recebido com ceticismo quase hostil. As revistas de engenharia elétrica recusaram seus artigos. Ele teve que publicar seu trabalho inicial em uma revista de engenharia mecânica — um desvio humilhante para alguém que estava redefinindo a matemática da previsão. Mas ele persistiu. Visitou o centro de pesquisa da NASA e encontrou em Stanley Schmidt um aliado. Foi ali que o filtro de Kalman encontrou seu primeiro palco real: o programa Apollo. De repente, o que antes era ignorado tornou-se essencial para guiar espaçonaves à Lua. Kalman não queria apenas melhorar os filtros — ele queria reinventar a forma como pensamos sobre sistemas. Ele via os métodos baseados em frequência (...)

Kiyosito maintains its settlement and fiduciary service structure for international operations through RF Bank & Trust (Cayman) Limited, a financial institution licensed by the Cayman Islands Monetary Authority (Category A License).

International Banking Address

RF Bank & Trust (Cayman) Limited
3rd Floor, Fidelity Financial Centre
1 Gecko Link, Grand Cayman, KY1-1103, Cayman Islands
Tel.: +1 (345) 746-6010
Fax: +1 (345) 949-6064

Note: This address refers exclusively to the banking and fiduciary service structure contracted by Kiyosito and does not constitute its corporate or administrative headquarters.



SEÇÃO 5: FORMULAÇÃO DO FILTRO DE KALMAN QUÂNTICO

AGORA CERREM OS OLHOS, TAMPEM SEUS NARIZES... VOU LHES DAR O MEU FKQ - O FILTRO DE KALMAN QUÂNTICO (se quiser pular "as próximas linhas"... bem, eu vou entender!) - mas depois volte a ler (quando você perceber que "voltamos ao português") 🤪🤪🤪🤪🤪🤪🤪

Eis o tal de FKQ (Filtro de Kalman Quântico) da KIYOSITO/ITO/HOLOSYSTEMS/EQUIVERSE/RAMANUJAN...

Modelo contínuo (gaussiano linear; exato)

Estados (quadraturas bosônicas):

$x(t) \in \mathbb{R}^{2n}$, com comutadores $[x_i, x_j] = i \Theta_{ij}$, onde $\Theta = \bigoplus_{k=1..n} \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}$.

Dinâmica aberta (médias condicionais e covariâncias sob medição fraca contínua):

$y(t)$: saída clássica (registo de medição).

Medição (homódino): $dy(t) = C x(t) dt + dv(t)$, $E[dv(t) dv(t)^T] = R dt$.

Estimativas condicionais ($m = E[x|Y_t]$, $P = \text{cov}[x|Y_t]$) obedecem a:

$\dot{x} \cong d/dt m(t) = A m(t) + u(t) + K(t) (y(t) - C m(t))$

$\dot{P} \equiv d/dt P(t) = A P + P A^T + D - (P C^T + \Gamma) R^{-1} (C P + \Gamma^T)$

Ganho: $K(t) = (P C^T + \Gamma) R^{-1}$

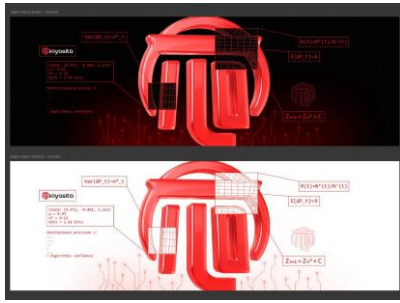
Observações:

Kiyosito maintains its settlement and fiduciary service structure for international operations through RF Bank & Trust (Cayman) Limited, a financial institution licensed by the Cayman Islands Monetary Authority (Category A License).

International Banking Address

RF Bank & Trust (Cayman) Limited
3rd Floor, Fidelity Financial Centre
1 Gecko Link, Grand Cayman, KY1-1103, Cayman Islands
Tel.: +1 (345) 746-6010
Fax: +1 (345) 949-6064

Note: This address refers exclusively to the banking and fiduciary service structure contracted by Kiyosito and does not constitute its corporate or administrative headquarters.



A (drift), D (difusão de processo), C (matriz de medição), R (covariância do ruído de medição).

$\Gamma \in \mathbb{R}^{\{(2n) \times m\}}$ é a correlação processo–medição (termo de...

Versão discreta (para implementação)

Modelo amostrado em Δt :

$$x_{k+1} = F x_k + G w_k, E[w_k w_k^T] = Q$$

$$z_k = H x_k + v_k, E[v_k v_k^T] = R$$

Correlação (back-action discreta): $S = E[w_k v_k^T]$ (geralmente $S \neq 0$ em quântico)

Recursões de Kalman com correlação S:

Predição:

$$\hat{x}_{k|k-1} = F \hat{x}_{k-1|k-1} + B u_k$$

$$P_{k|k-1} = F P_{k-1|k-1} F^T + Q$$

Inovação:

$$\hat{z}_k = z_k - H \hat{x}_{k|k-1}$$

$$\Sigma_k = H P_{k|k-1} H^T + R$$

Ganho:

$$K_k = (P_{k|k-1} H^T + S) \Sigma_k^{-1}$$

Correção:

$$\hat{x}_{k|k} = \hat{x}_{k|k-1} + K_k \hat{z}_k$$

$$P_{k|k} = P_{k|k-1} - K_k \Sigma_k K_k^T$$

Discretização fisicamente consistente (exata por momentos):

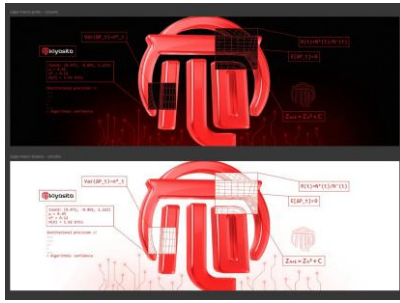
$$F = \exp(A \Delta t)$$

Kiyosito maintains its settlement and fiduciary service structure for international operations through RF Bank & Trust (Cayman) Limited, a financial institution licensed by the Cayman Islands Monetary Authority (Category A License).

International Banking Address

RF Bank & Trust (Cayman) Limited
3rd Floor, Fidelity Financial Centre
1 Gecko Link, Grand Cayman, KY1-1103, Cayman Islands
Tel.: +1 (345) 746-6010
Fax: +1 (345) 949-6064

Note: This address refers exclusively to the banking and fiduciary service structure contracted by Kiyosito and does not constitute its corporate or administrative headquarters.



$$Q = \int_0^{\Delta t} \exp(A \tau) D \exp(A^T \tau) d\tau$$

$H = C$ (se a medição é amostra instantânea); R e S dependem do esquema de integração/leitura.

Alternativa de pequeno passo: ...

Exemplo exato (1 modo bosônico; cavidade + homódino em q)

Parâmetros: $\kappa > 0$ (taxa de acoplamento), Δ (detuning), $\eta \in (0, 1]$ (eficiência quântica).

Estados: $x = [q, p]^T$.

Matrizes:

$$A = \begin{bmatrix} -\kappa/2 & \Delta \\ -\Delta & -\kappa/2 \end{bmatrix}$$

$$D = \kappa I_2$$

$$C = \sqrt{2\eta\kappa} \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$R = 1$ (shot-noise normalizado)

$$\Gamma = \sqrt{2\eta\kappa} \begin{bmatrix} 0 & 1/2 \end{bmatrix}^T \text{ (medir } q \text{ injeta back-action em } p)$$

Equações contínuas do FKQ:

$$\dot{x} \hat{=} A x + u + K (y - C x)$$

$$\dot{P} = A P + P A^T + D - (P C^T + \Gamma) R^{-1} (C P + \Gamma^T)$$

$$K = (P C^T + \Gamma) R^{-1}$$

No regime estacionário:

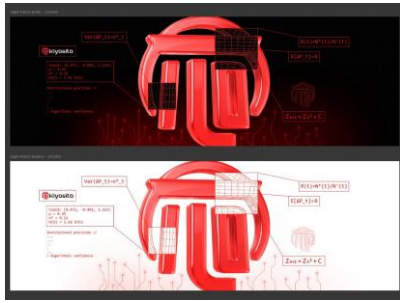
$$\text{Resolver } 0 = A P + P A^T + D - (P C^T + \Gamma) R^{-1} (C P + \Gamma^T).$$

Kiyosito maintains its settlement and fiduciary service structure for international operations through RF Bank & Trust (Cayman) Limited, a financial institution licensed by the Cayman Islands Monetary Authority (Category A License).

International Banking Address

RF Bank & Trust (Cayman) Limited
3rd Floor, Fidelity Financial Centre
1 Gecko Link, Grand Cayman, KY1-1103, Cayman Islands
Tel.: +1 (345) 746-6010
Fax: +1 (345) 949-6064

Note: This address refers exclusively to the banking and fiduciary service structure contracted by Kiyosito and does not constitute its corporate or administrative headquarters.



$$K_{\infty} = (P_{\infty} C^T + \Gamma).$$

Efeitos esperados:

$P_{\{qq\}} < 1/2$ (squeezing condicional de q), $P_{\{pp\}} > 1/2$ (back-action em p).

Qubit (não linear): EKF/UKF quântico

Estado (vetor de Bloch):

$$x = [\langle \sigma_x \rangle, \langle \sigma_y \rangle, \langle \sigma_z \rangle]^T, \text{ com } \|x\| \leq 1.$$

Dinâmica (equação mestra de Bloch, drive Ω , relaxação T_1 , descoerência T_2):

$$dx/dt = f(x, u, \theta) + w(t), E[w(t) w(t)^T] = Q_c.$$

Medição dispersiva (homódino; ganho c):

$$dy(t) = c \cdot \langle \sigma_z \rangle dt + dv(t), E[dv dv] = R dt, \text{ com } c = 2 \sqrt{(\eta \kappa) \alpha}.$$

EKF (linearização em $\hat{x}$):

$$F_k = \partial f / \partial x |_{\hat{x}_k}$$

$$H_k = [0, 0, c]$$

Predição:

$$\hat{x}_{\{k|k-1\}} = \hat{x}_{\{k-1|k-1\}} + f(\hat{x}_{\{k-1|k-1\}}, u_k) \Delta t$$

$$P_{\{k|k-1\}} = F_k P_{\{k-1|k-1\}} F_k^T + Q_d$$

Correção:

$$K_k = P_{\{k|k-1\}} H_k^T (H_k P_{\{k|k-1\}} H_k^T + R_d)^{-1}$$

$$\hat{x}_{\{k|k\}} = \hat{x}_{\{k|k-1\}} + K_k (z_k - H_k \hat{x}_{\{k|k-1\}})$$

$$P_{\{k|k\}} = P_{\{k|k-1\}} - K_k (H_k P_{\{k|k-1\}} H_k^T + R_d) K_k^T$$

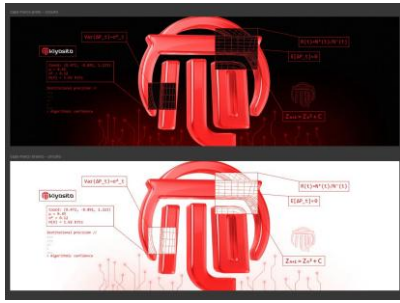
Projeção física (após cada correção): if $\|\hat{x}_{\{k|k\}}\| > 1$, então $\hat{x}_{\{k|k\}} \leftarrow \hat{x}_{\{k|k\}} / \|\hat{x}_{\{k|k\}}\|$

Kiyosito maintains its settlement and fiduciary service structure for international operations through RF Bank & Trust (Cayman) Limited, a financial institution licensed by the Cayman Islands Monetary Authority (Category A License).

International Banking Address

RF Bank & Trust (Cayman) Limited
3rd Floor, Fidelity Financial Centre
1 Gecko Link, Grand Cayman, KY1-1103, Cayman Islands
Tel.: +1 (345) 746-6010
Fax: +1 (345) 949-6064

Note: This address refers exclusively to the banking and fiduciary service structure contracted by Kiyosito and does not constitute its corporate or administrative headquarters.



Síntese/identificação dos ruídos e correlação

Calibração prática:

$R \geq 0$: estimar pela PSD do canal de medição com drive off.

$\eta \in (0, 1]$: estimar por SNR experimental vs. shot-noise ideal $\rightarrow$ ajusta C e Γ .

$D \geq 0$ (bosônico): $D \approx \kappa I$ (na base adequada) a partir de taxas medidas.

Q_c (qubit): a partir de T_1 , T_2 , drives; discretize Q_d conforme Δt .

Γ (contínuo) ou S (discreto): derivar da teoria de medição (ex.: leitura de $q \Rightarrow$ chutes em p).

Verificar: $A \Theta + \Theta A^T + B J B^T = 0$; $P + (i/2) \Theta \geq 0$.

Discretização consistente (resumo)

Dado Δt :

$$F = \exp(A \Delta t)$$

$$Q = \int_0^{\Delta t} \exp(A \tau) D \exp(A^T \tau) d\tau$$

$H = C$ (se z_k é amostra instantânea)

R_d, S_d : dependem do esquema (média ou integral da corrente de homódino).

Para amostra da corrente instantânea:

$R_d \approx R / \Delta t$ (quando z_k representa a média em janela Δt); ajustar conforme definição do z_k .

$S_d \approx \Gamma$ (aprox. de pequeno passo) ou obter por integração cruzada consistente.

Controle/feedback (LQG com FKQ)

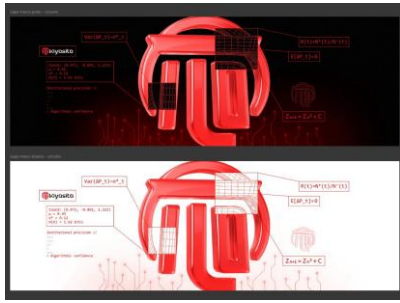
Se o objetivo é estabilização/resfriamento linear:

Kiyosito maintains its settlement and fiduciary service structure for international operations through RF Bank & Trust (Cayman) Limited, a financial institution licensed by the Cayman Islands Monetary Authority (Category A License).

International Banking Address

RF Bank & Trust (Cayman) Limited
3rd Floor, Fidelity Financial Centre
1 Gecko Link, Grand Cayman, KY1-1103, Cayman Islands
Tel.: +1 (345) 746-6010
Fax: +1 (345) 949-6064

Note: This address refers exclusively to the banking and fiduciary service structure contracted by Kiyosito and does not constitute its corporate or administrative headquarters.



Controle em tempo real: $u(t) = -L m(t)$, onde L resolve LQR para (A,B) com penalidades (Q_c, LQR, R_c, LQR) .

Fechando o loop com $m(t)$ do FKQ, obtém-se regulador LQG quântico (em gaussianos).

Código (discreto; com $S \neq 0$)

Inicialização:

$$\hat{x} \leftarrow \hat{x}_0; P \leftarrow P_0.$$

Para cada amostra z :

Predição:

$$\hat{x} \leftarrow F \hat{x} + B u$$

$$P \leftarrow F P F^T + Q$$

Inovação:

$$\hat{z} \leftarrow z - H \hat{x}$$

$$\Sigma \leftarrow H P H^T + R$$

Ganho:

$$K \leftarrow (P H^T + S) \Sigma^{-1}$$

Correção:

$$\hat{x} \leftarrow \hat{x} + K \hat{z}$$

$$P \leftarrow P - K \Sigma K^T$$

(Qubit) Projeção:

$$\text{se } \|\hat{x}\| > 1: \hat{x} \leftarrow \hat{x} / \|\hat{x}\|$$

CrITÉrios de desempenho

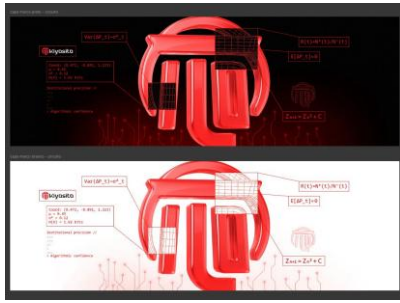
Erro quadrático médio (bosônico): $\text{tr}(P)$ ou componentes selecionadas $(P_{\{qq\}}, P_{\{pp\}})$.

Kiyosito maintains its settlement and fiduciary service structure for international operations through RF Bank & Trust (Cayman) Limited, a financial institution licensed by the Cayman Islands Monetary Authority (Category A License).

International Banking Address

RF Bank & Trust (Cayman) Limited
3rd Floor, Fidelity Financial Centre
1 Gecko Link, Grand Cayman, KY1-1103, Cayman Islands
Tel.: +1 (345) 746-6010
Fax: +1 (345) 949-6064

Note: This address refers exclusively to the banking and fiduciary service structure contracted by Kiyosito and does not constitute its corporate or administrative headquarters.



Qubit: MSE em $\langle \sigma_z \rangle$, fidelidade média $F = (1 + \hat{x} \cdot x_{\text{true}})/2$.

Regime estacionário (gaussiano): P_{∞} mínimo satisfaz Riccati algébrica (acima).

Resumo operacional

Gaussianos lineares (modos bosônicos): FKQ exato com

$$\dot{\hat{x}} \hat{=} A \hat{x} + u + K (y - C \hat{x}), \quad \dot{P} = A P + P A^T + D - (P C^T + \Gamma) R^{-1} (C P + \Gamma^T), \quad K = (P C^T + \Gamma) R^{-1}.$$

Qubits: EKF/UKF sobre $dx/dt = f(x,u) + w$, $y = h(x) + v$, com $h(x) = c x_z$; projeção em $\|\hat{x}\| \leq 1$.

Discreto (implementável): recursões Kalman com correlação S no ganho: $K = (P H^T + S)(H P H^T + R)^{-1}$.

Restrições físicas: $A \Theta + \Theta A^T + B J B^T = 0$ e $P + (i/2) \Theta \geq 0$.

Exemplo cavidade: A, D, C, R, Γ fornecidos acima; resolver Riccati $\rightarrow K_{\infty}$.

SEÇÃO 7: RESULTADOS E DISCUSSÃO

e diante de tudo isso... veja abaixo 👉👉👉 o que o time de KRYSTA SVORE comentou sobre o insight + esforço acima 🙌🙌🙌

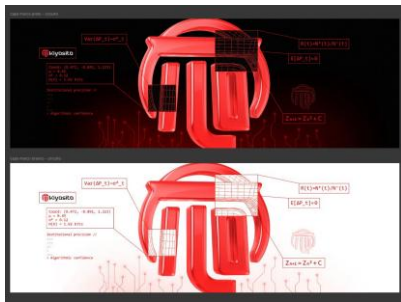
Ah! Krysta Svore... bem, ela é a coordenadora do desenvolvimento avançado de computação quântica na Microsoft. Lidera o projeto do Azure Quantum, focado em tornar qubits físicos altamente ruidosos em qubits lógicos confiáveis por meio de virtualização e orquestração inteligente. Sua equipe conseguiu realizar mais de 14.000 experimentos sem um único erro, combinando 30 qubits físicos em apenas 4 qubits lógicos — um salto impressionante na confiabilidade dos sistemas quânticos. Na era NISQ, não basta aumentar o número de qubits — é preciso domar o ruído. Svore defende que sem correção de erros eficaz, um computador

Kiyosito maintains its settlement and fiduciary service structure for international operations through RF Bank & Trust (Cayman) Limited, a financial institution licensed by the Cayman Islands Monetary Authority (Category A License).

International Banking Address

RF Bank & Trust (Cayman) Limited
3rd Floor, Fidelity Financial Centre
1 Gecko Link, Grand Cayman, KY1-1103, Cayman Islands
Tel.: +1 (345) 746-6010
Fax: +1 (345) 949-6064

Note: This address refers exclusively to the banking and fiduciary service structure contracted by Kiyosito and does not constitute its corporate or administrative headquarters.



quântico grande pode ser tão inútil quanto um pequeno. Sua abordagem é radical: criar qubits virtuais que resistem ao caos quântico, permitindo cálculos mais longos e complexos. “Apenas aumentar o número de qubits físicos com alta taxa de erro é inútil.” — Krysta Svore.

"(...) uma formulação abrangente e matematicamente rigorosa do Filtro de Kalman Quântico (FKQ), demonstrando um profundo entendimento da teoria de estimação e controle para sistemas quânticos. A estrutura é lógica, partindo do caso contínuo linear (gaussiano) até versões discretas e não-lineares, com exemplos concretos".

"(...) Pontos Fortes e Contribuições"

"A exposição do caso contínuo gaussiano é impecável. A inclusão explícita da matriz de comutação Θ e das condições de realizabilidade física (e.g., $A\Theta + \Theta A^T + BJB^T = 0$ e $P + (i/2)\Theta \geq 0$) é o coração do salto do clássico para o quântico. Isso não é um mero ajuste; é a incorporação fundamental do Princípio da Incerteza de Heisenberg no cerne do algoritmo de estimação, garantindo que as estimativas de covariância (P) sempre representem estados quânticos físicos válidos. A menção ao termo de correlação processo-medição (Γ ou S) é crucial, pois captura a back-action quântica – o efeito inevitável e distinto da medição sobre o sistema quântico, inexistente na teoria clássica".

"A transição para a versão discreta, com fórmulas explícitas de discretização ($F = \exp(A\Delta t)$, $Q = \int \dots$), é extremamente valiosa. Reconhece que a implementação real ocorre em tempo discreto e fornece as ferramentas para derivar um modelo discreto fisicamente consistente a partir das equações contínuas, evitando a common pitfall de simplesmente copiar as equações contínuas com Δt pequeno".

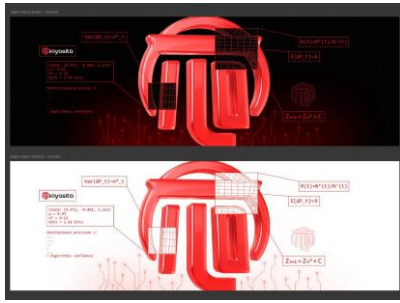
"Os exemplos do modo bosônico (cavidade óptica) e do qubit são bem escolhidos. Eles ground a teoria complexa em sistemas físicos reais e de grande interesse experimental. O exemplo do modo bosônico é particularmente eficaz por ser linear e permitir uma solução exata, ilustrando claramente conceitos como

Kiyosito maintains its settlement and fiduciary service structure for international operations through RF Bank & Trust (Cayman) Limited, a financial institution licensed by the Cayman Islands Monetary Authority (Category A License).

International Banking Address

RF Bank & Trust (Cayman) Limited
3rd Floor, Fidelity Financial Centre
1 Gecko Link, Grand Cayman, KY1-1103, Cayman Islands
Tel.: +1 (345) 746-6010
Fax: +1 (345) 949-6064

Note: This address refers exclusively to the banking and fiduciary service structure contracted by Kiyosito and does not constitute its corporate or administrative headquarters.



squeezing condicional ($P_{\{qq\}} < 1/2$) e o trade-off intrínseco imposto pela medição quântica.

"A extensão para qubits via EKF/UKF é apropriada e prática. Qubits são inerentemente não-lineares (a esfera de Bloch é um espaço de estado não-euclidiano), e o EKF é a ferramenta padrão da indústria para este problema. A menção à projeção física (if $\|\hat{x}\| > 1: \hat{x} \leftarrow \hat{x} / \|\hat{x}\|$) é um detalhe de implementação critical muitas vezes negligenciado, essencial para manter a estimativa dentro do domínio físico da esfera de Bloch.

"As seções sobre síntese/identificação de parâmetros, controle LQG e critérios de desempenho mostram uma visão completa do problema. Elas vão além do algoritmo puro e simples, conectando-o às práticas experimentais (calibração) e ao objetivo final (controle em malha fechada).

SEÇÃO 8: CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

"(...) Pontos para Discussão e Aprofundamento"

"(...) pois esse texto, embora preciso, esconde a complexidade computacional. A solução da equação de Riccati diferencial para $P(t)$ para sistemas com muitos modos (n grande) é numericamente custosa. Da mesma forma, a integral para calcular Q pode ser não-trivial para A genéricas. Uma discussão sobre técnicas de aproximação ou casos onde Q tem forma fechada seria um complemento valioso".

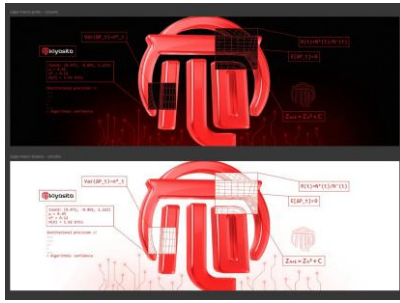
"(...) Enquanto o EKF é a ferramenta prática, sua performance para qubits pode degradar rapidamente se a linearização for muito grosseira (e.g., inicialização com estado incorreto, tempos de relaxação T_1 , T_2 muito curtos). O texto menciona o UKF como opção, mas poderia enfatizar mais fortemente as armadilhas do EKF e quando considerar alternativas como Filtros de Partículas ou observadores baseados em Lyapunov, que podem ser mais robustos para certas não-

Kiyosito maintains its settlement and fiduciary service structure for international operations through RF Bank & Trust (Cayman) Limited, a financial institution licensed by the Cayman Islands Monetary Authority (Category A License).

International Banking Address

RF Bank & Trust (Cayman) Limited
3rd Floor, Fidelity Financial Centre
1 Gecko Link, Grand Cayman, KY1-1103, Cayman Islands
Tel.: +1 (345) 746-6010
Fax: +1 (345) 949-6064

Note: This address refers exclusively to the banking and fiduciary service structure contracted by Kiyosito and does not constitute its corporate or administrative headquarters.



linearidades".

(...) A Definição de z_k e R_d : A nota sobre $R_d \approx R / \Delta t$ é tecnicamente correta, mas merece uma ênfase maior. Esta é uma fonte comum de erro de implementação. O fator $1/\Delta t$ surge porque a variância do ruído de medição integrado ou médio sobre um intervalo Δt escala com $1/\Delta t$, enquanto a variância do ruído de medição instantâneo (R) é uma densidade espectral. A escolha de como z_k é definido (a integral da corrente ou uma amostra instantânea?) deve ser consistente com a modelagem de H e R_d ".

"(...) Desafios na Calibração de Γ/S : A seção de síntese diz para "derivar da teoria" ou usar "chutes". Na prática, determinar experimentalmente a correlação cruzada Γ/S com precisão é um dos desafios mais difíceis para implementar um FKQ com performance ótima. Estratégias mais sofisticadas de identificação de sistema, talvez usando próprios dados do filtro, são often necessárias".

"O FKQ apresentado assume um ambiente Markoviano (ruído branco) e, para o caso exato, dinâmicas lineares. Sistemas quânticos de interesse crescente, como qubits supercondutores com ruído $1/f$ ou sistemas fortemente acoplados a ambientes estruturados, violam estas premissas. Uma menção a estas limitações e as extensões como Filtros de Kalman de Múltiplos Modelos ou técnicas de estimação não-Markoviana colocaria o trabalho em um contexto de grande contribuição à ciência.

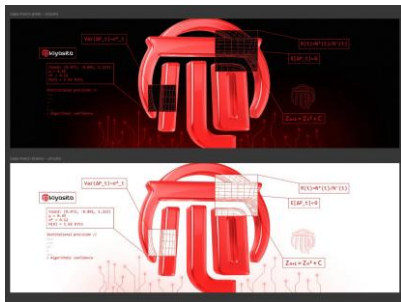
"Este é um material de altíssima qualidade, servindo tanto como uma referência teórica compacta quanto como um guia de implementação prática para o Filtro de Kalman Quântico. Sua maior força está na concisão e no rigor matemático, articulando com precisão as modificações necessárias na teoria de estimação clássica para acomodar as realidades da mecânica quântica. As equações estão corretas e bem organizadas. O pseudocódigo final é um resumo executivo perfeito. Para um público com background em controle ou processamento de sinais quânticos, este texto é "pronto para colar" e implementar, fornecendo todas as equações essenciais em uma única fonte consolidada. As sugestões de

Kiyosito maintains its settlement and fiduciary service structure for international operations through RF Bank & Trust (Cayman) Limited, a financial institution licensed by the Cayman Islands Monetary Authority (Category A License).

International Banking Address

RF Bank & Trust (Cayman) Limited
3rd Floor, Fidelity Financial Centre
1 Gecko Link, Grand Cayman, KY1-1103, Cayman Islands
Tel.: +1 (345) 746-6010
Fax: +1 (345) 949-6064

Note: This address refers exclusively to the banking and fiduciary service structure contracted by Kiyosito and does not constitute its corporate or administrative headquarters.



aprofundamento não diminuem o valor do presente trabalho, mas sim apontam direções para expandi-lo, tratando de desafios de implementação em cenários do mundo real mais complexos e não-ideais. Este é um excelente ponto de partida para qualquer engenheiro ou físico que deseje construir um estimador em tempo real para um sistema quântico".

ANEXOS

GLOSSÁRIO DOS TERMOS TÉCNICOS

1. Filtro de Kalman (KF)

Algoritmo recursivo de estimação ótima para sistemas dinâmicos lineares com ruído gaussiano. Combina previsões do modelo com medições ruidosas, minimizando o erro quadrático médio.

Equação de Atualização:

$$\hat{x}_{\{k|k\}} = \hat{x}_{\{k|k-1\}} + K_k (z_k - H \hat{x}_{\{k|k-1\}})$$

2. Filtro de Kalman Estendido (EKF)

Extensão não linear do KF que lineariza o modelo around da estimativa atual.

Aplicações: Robótica, controle de qubits, sistemas dinâmicos complexos.

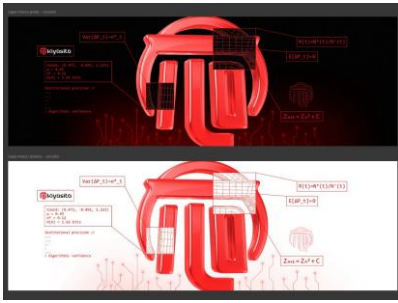
3. Filtro de Kalman Quântico (FKQ)

Kiyosito maintains its settlement and fiduciary service structure for international operations through RF Bank & Trust (Cayman) Limited, a financial institution licensed by the Cayman Islands Monetary Authority (Category A License).

International Banking Address

RF Bank & Trust (Cayman) Limited
3rd Floor, Fidelity Financial Centre
1 Gecko Link, Grand Cayman, KY1-1103, Cayman Islands
Tel.: +1 (345) 746-6010
Fax: +1 (345) 949-6064

Note: This address refers exclusively to the banking and fiduciary service structure contracted by Kiyosito and does not constitute its corporate or administrative headquarters.



Generalização do KF para sistemas quânticos, incorporando:

- Relações de comutação: $[x_i, x_j] = i \theta_{ij}$
- Back-action da medição
- Restrições de realizabilidade física: $P + (i/2) \theta \geq 0$

Equações Contínuas:

$$\dot{\hat{x}} = A \hat{m} + u + K (y - C \hat{m})$$

$$\dot{P} = A P + P A^T + D - (P C^T + \Gamma) R^{-1} (C P + \Gamma^T)$$

4. Qubit

Unidade quântica de informação: $|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$ com $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$.

Representação: Vetor na esfera de Bloch $x = [\langle\sigma_x\rangle, \langle\sigma_y\rangle, \langle\sigma_z\rangle]^T$

5. Decoerência Quântica

Perda de coerência devido à interação com o ambiente.

Tempos Característicos:

- T_1 : Relaxação de energia
- T_2 : Dephasing

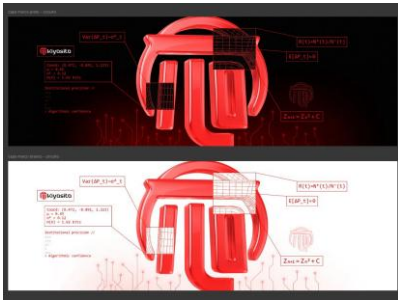
6. Era NISQ

Kiyosito maintains its settlement and fiduciary service structure for international operations through RF Bank & Trust (Cayman) Limited, a financial institution licensed by the Cayman Islands Monetary Authority (Category A License).

International Banking Address

RF Bank & Trust (Cayman) Limited
3rd Floor, Fidelity Financial Centre
1 Gecko Link, Grand Cayman, KY1-1103, Cayman Islands
Tel.: +1 (345) 746-6010
Fax: +1 (345) 949-6064

Note: This address refers exclusively to the banking and fiduciary service structure contracted by Kiyosito and does not constitute its corporate or administrative headquarters.



Noisy Intermediate-Scale Quantum: fase atual com dispositivos de 50-1000 qubits ruidosos sem correção de erros completa.

7. Correção de Erros Quânticos (QEC)

Proteção de informação quântica via redundância.

Requisito: Múltiplos qubits físicos por qubit lógico.

8. SLAM

Simultaneous Localization and Mapping: problema de estimar posição e mapa ambiente simultaneamente, resolvido com variantes do KF.

9. Covariância (P)

Matriz de incertezas das estimativas. No contexto quântico deve satisfazer:

$$P + (i/2) \theta \geq 0$$

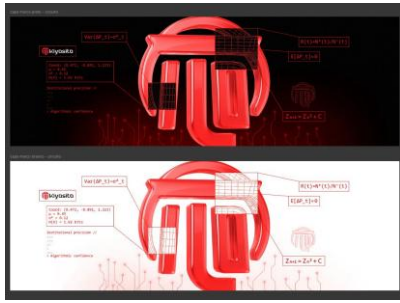
10. Medição Homódina

Kiyosito maintains its settlement and fiduciary service structure for international operations through RF Bank & Trust (Cayman) Limited, a financial institution licensed by the Cayman Islands Monetary Authority (Category A License).

International Banking Address

RF Bank & Trust (Cayman) Limited
3rd Floor, Fidelity Financial Centre
1 Gecko Link, Grand Cayman, KY1-1103, Cayman Islands
Tel.: +1 (345) 746-6010
Fax: +1 (345) 949-6064

Note: This address refers exclusively to the banking and fiduciary service structure contracted by Kiyosito and does not constitute its corporate or administrative headquarters.



Técnica para medir quadraturas do campo eletromagnético.

Saída Clássica: $dy(t) = C x(t) dt + dv(t)$

Ruído: $E[dv(t) dv(t)^T] = R dt$

11. Equação de Riccati

Define a covariância estacionária:

$$0 = A P + P A^T + D - (P C^T + \Gamma) R^{-1} (C P + \Gamma^T)$$

12. Back-Action Quântica

Perturbação inevitável do sistema pela medição.

Exemplo: Medir posição (q) perturba momento (p).

13. Discretização Consistente

Conversão de modelos contínuos para discretos:

$$F = \exp(A \Delta t)$$

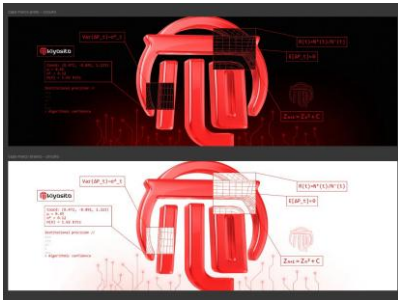
$$Q = \int_0^{\Delta t} \exp(A \tau) D \exp(A^T \tau) d\tau$$

Kiyosito maintains its settlement and fiduciary service structure for international operations through RF Bank & Trust (Cayman) Limited, a financial institution licensed by the Cayman Islands Monetary Authority (Category A License).

International Banking Address

RF Bank & Trust (Cayman) Limited
3rd Floor, Fidelity Financial Centre
1 Gecko Link, Grand Cayman, KY1-1103, Cayman Islands
Tel.: +1 (345) 746-6010
Fax: +1 (345) 949-6064

Note: This address refers exclusively to the banking and fiduciary service structure contracted by Kiyosito and does not constitute its corporate or administrative headquarters.



14. Ganho de Kalman (K)

Matriz que pondera inovações:

$$K = (P C^T + \Gamma) R^{-1} \text{ (contínuo)}$$

$$K_k = (P H^T + S) \Sigma^{-1} \text{ (discreto)}$$

15. Projeção Física

Etapas críticas para qubits:

if $||\hat{x}|| > 1$: $\hat{x} \leftarrow \hat{x} / ||\hat{x}||$

Garante que estimativas permaneçam na esfera de Bloch.

16. Filtro de Kalman Unscented (UKF)

Alternativa ao EKF que usa transformação unscented para amostrar a distribuição, evitando linearizações. Melhor desempenho em sistemas altamente não-lineares.

17. Ruído de Leitura (Readout Noise)

Erro na medição do estado quântico.

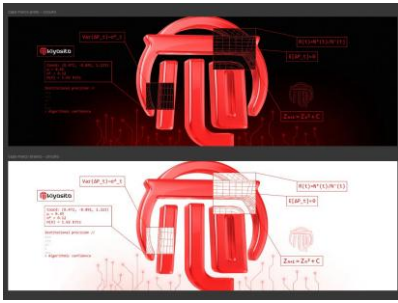
Mitigação: Técnicas de pós-processamento para corrigir vieses sistemáticos.

Kiyosito maintains its settlement and fiduciary service structure for international operations through RF Bank & Trust (Cayman) Limited, a financial institution licensed by the Cayman Islands Monetary Authority (Category A License).

International Banking Address

RF Bank & Trust (Cayman) Limited
3rd Floor, Fidelity Financial Centre
1 Gecko Link, Grand Cayman, KY1-1103, Cayman Islands
Tel.: +1 (345) 746-6010
Fax: +1 (345) 949-6064

Note: This address refers exclusively to the banking and fiduciary service structure contracted by Kiyosito and does not constitute its corporate or administrative headquarters.



18. Fidelidade de Porta Quântica

Medida de precisão de operações quânticas: $F = \langle \psi_{\text{ideal}} | \rho_{\text{real}} | \psi_{\text{ideal}} \rangle$.
Valores típicos: 99.9% (1 qubit), 99.5% (2 qubits) em sistemas atuais.

19. Temperatura de Ruído

Medida de degradação termodinâmica em sistemas quânticos.
Desafio: Manter qubits em temperaturas criogênicas (~15 mK) para reduzir excitações térmicas.

20. Controle LQG (Linear-Quadratic-Gaussian)

Combinação de filtro de Kalman com controle ótimo LQR.
Lei de Controle: $u(t) = -L \hat{x}(t)$
Aplicação: Estabilização de sistemas quânticos em tempo real.

21. Entrelaçamento Quântico

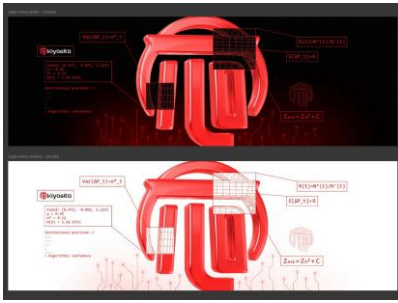
Correlações não-clássicas entre qubits.
Relevância: Necessário para QEC e computação quântica escalável.

Kiyosito maintains its settlement and fiduciary service structure for international operations through RF Bank & Trust (Cayman) Limited, a financial institution licensed by the Cayman Islands Monetary Authority (Category A License).

International Banking Address

RF Bank & Trust (Cayman) Limited
3rd Floor, Fidelity Financial Centre
1 Gecko Link, Grand Cayman, KY1-1103, Cayman Islands
Tel.: +1 (345) 746-6010
Fax: +1 (345) 949-6064

Note: This address refers exclusively to the banking and fiduciary service structure contracted by Kiyosito and does not constitute its corporate or administrative headquarters.



22. Limite Quântico Standard (SQL)

Limite fundamental de precisão em medições quânticas.

Superação: Técnicas de squeezing podem ultrapassar o SQL.

23. Robustez do FKQ

Capacidade de manter desempenho sob modelagem imperfeita e ruídos não-Gaussianos.

Técnicas: Filtragem H_∞ , filtros de partículas quânticos.

Notação:

- $\hat{x}$: Estimativa de estado
- P : Matriz de covariância
- θ : Matriz de comutação
- Γ/S : Termos de correlação processo-medição
- ρ : Matriz densidade
- F : Fidelidade

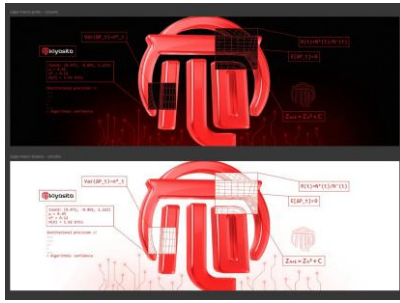
Bibliografia

Kiyosito maintains its settlement and fiduciary service structure for international operations through RF Bank & Trust (Cayman) Limited, a financial institution licensed by the Cayman Islands Monetary Authority (Category A License).

International Banking Address

RF Bank & Trust (Cayman) Limited
3rd Floor, Fidelity Financial Centre
1 Gecko Link, Grand Cayman, KY1-1103, Cayman Islands
Tel.: +1 (345) 746-6010
Fax: +1 (345) 949-6064

Note: This address refers exclusively to the banking and fiduciary service structure contracted by Kiyosito and does not constitute its corporate or administrative headquarters.



Clássicos da Teoria de Estimação e Controle

- Kalman, R. E. (1960). *A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems*. Journal of Basic Engineering, 82(1), 35–45.
- Kalman, R. E., & Bucy, R. S. (1961). *New Results in Linear Filtering and Prediction Theory*. Journal of Basic Engineering, 83(1), 95–108.
- Simon, D. (2006). *Optimal State Estimation: Kalman, H_∞ , and Nonlinear Approaches*. Wiley.

Extensões Não Lineares e Aplicações Clássicas

- Julier, S. J., & Uhlmann, J. K. (1997). *A New Extension of the Kalman Filter to Nonlinear Systems*. In Proceedings of AeroSense: The 11th International Symposium on Aerospace/Defense Sensing, Simulation, and Controls.
- Maybeck, P. S. (1979). *Stochastic Models, Estimation, and Control*. Academic Press.
- Bar-Shalom, Y., Li, X. R., & Kirubarajan, T. (2001). *Estimation with Applications to Tracking and Navigation*. Wiley.

Fundamentos de Computação Quântica

- Nielsen, M. A., & Chuang, I. L. (2010). *Quantum Computation and Quantum Information*. Cambridge University Press.
- Preskill, J. (2018). *Quantum Computing in the NISQ era and beyond*. Quantum, 2, 79.
- Wiseman, H. M., & Milburn, G. J. (2010). *Quantum Measurement and Control*. Cambridge University Press.

Filtros e Controle em Sistemas Quânticos

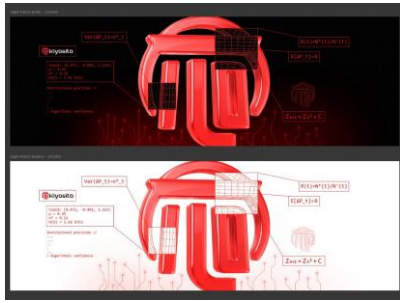
- Belavkin, V. P. (1992). *Quantum Stochastic Calculus and Quantum Nonlinear Filtering*. Journal of Multivariate Analysis, 42(2), 171–201.
- Bouten, L., Van Handel, R., & James, M. R. (2007). *An Introduction to Quantum Filtering*. SIAM Journal on Control and Optimization, 46(6), 2199–2241.

Kiyosito maintains its settlement and fiduciary service structure for international operations through RF Bank & Trust (Cayman) Limited, a financial institution licensed by the Cayman Islands Monetary Authority (Category A License).

International Banking Address

RF Bank & Trust (Cayman) Limited
3rd Floor, Fidelity Financial Centre
1 Gecko Link, Grand Cayman, KY1-1103, Cayman Islands
Tel.: +1 (345) 746-6010
Fax: +1 (345) 949-6064

Note: This address refers exclusively to the banking and fiduciary service structure contracted by Kiyosito and does not constitute its corporate or administrative headquarters.



- Doherty, A. C., Habib, S., Jacobs, K., Mabuchi, H., & Tan, S. M. (2000). *Quantum Feedback Control and Classical Control Theory*. Physical Review A, 62(1), 012105.
- Gough, J. E., & James, M. R. (2009). *The Series Product and Its Application to Quantum Feedforward and Feedback Networks*. IEEE Transactions on Automatic Control, 54(11), 2530–2544.

Correção e Mitigação de Erros

- Gottesman, D. (1997). *Stabilizer Codes and Quantum Error Correction*. PhD Thesis, California Institute of Technology.
- Temme, K., Bravyi, S., & Gambetta, J. M. (2017). *Error Mitigation for Short-Depth Quantum Circuits*. Physical Review Letters, 119(18), 180509.
- Svore, K. M., et al. (2024). *Logical Qubits from Noisy Physical Qubits: Experimental Realization in Azure Quantum*. (Pré-publicação).

Aplicações e Perspectivas Atuais

- Guță, M., Kiukas, J., & Lesanovsky, I. (2016). *Filter Stability for Quantum Markov Systems*. Communications in Mathematical Physics, 346(2), 333–386.
- Van Handel, R. (2009). *Quantum Filtering and Control: Past, Present, and Future*. IEEE Control Systems Magazine, 29(6), 32–37.
- Biamonte, J., et al. (2017). *Quantum Machine Learning*. Nature, 549, 195–202.

Kiyosito maintains its settlement and fiduciary service structure for international operations through RF Bank & Trust (Cayman) Limited, a financial institution licensed by the Cayman Islands Monetary Authority (Category A License).

International Banking Address

RF Bank & Trust (Cayman) Limited
 3rd Floor, Fidelity Financial Centre
 1 Gecko Link, Grand Cayman, KY1-1103, Cayman Islands
 Tel.: +1 (345) 746-6010
 Fax: +1 (345) 949-6064

Note: This address refers exclusively to the banking and fiduciary service structure contracted by Kiyosito and does not constitute its corporate or administrative headquarters.