

Reconstrução de Sinal Digital no Calorímetro de telha hadrônica ATLAS

E. Fullana, J. Castelo, V. Castillo, C. Cuenca, A. Ferrer, E. Higon, C. Iglesias, A. Munar, J. Poveda, A. Ruiz-Martinez, B. Salvachua, C. Solans, R. Teuscher e J. Valls

Resumo— Apresentamos um algoritmo de Filtragem Ótima (OF) para reconstruir a energia, o tempo e o pedestal de um sinal fotomultiplicador a partir de suas amostras digitais. O algoritmo OF foi desenvolvido pela primeira vez para calorímetros de ionização líquida, sua implementação em cintiladores calorímetros, especificamente no calorímetro hadrônico ATLAS Tile (TileCal), é o objetivo deste estudo. O objetivo é implementar o algoritmo nos DSPs dos cartões Read Out Driver para reconstruir on-line a energia do calorímetro e fornecê-la ao gatilho de segundo nível. O algoritmo é testado e comparado com um algoritmo de filtragem simples usando calibração e dados reais de o detector TileCal. Os resultados são promissores principalmente nas regiões onde o ruído eletrônico contribui significativamente para a resolução.

I. INTRODUÇÃO

O calorímetro de telha hadrônica (TileCal) é o centro O calorímetro hadrônico do detector ATLAS [1]. É um calorímetro de amostragem feito de ferro como material passivo e cintiladores plásticos como material ativo. A luz produzida no cintiladores são enviados para fotomultiplicadores por mudança de comprimento de onda fibras. Os fotomultiplicadores (PMs) produzem um sinal elétrico que é moldado e digitalizado pela eletrônica frontal. As amostras digitais do sinal são transmitidas para o Read Placas Out Driver (ROD) através de fibras ópticas. A haste sistema reconstrói a energia de todos os canais do TileCal detector durante a latência de disparo de primeiro nível do ATLAS detector, que é de 10 s. Uma vez que a energia é reconstruída, ela é enviado para o gatilho de segundo nível. Existem canais 10000 no detector TileCal e sete amostras de 10 bits são coletadas por canal em cada evento. O ROD recebe os eventos uma vez eles são aceitos pelo trigger de primeiro nível, ou seja, a cada 10 s. μ Portanto, o sistema ROD deve processar até 80.000 Mb/s. Em para isso existem 32 placas-mãe ROD divididas em 4 partições. Cada placa-mãe é equipada com dois processadores unidades, cada uma com dois DSPs, portanto, cada DSP processa até 2.500 MB/s [2]. Portanto, o tempo de computação é uma restrição importante e os RODs devem implementar um algoritmo rápido para reconstruir energia com precisão em 10 μ s.

Artigo recebido em 05/06/05; revisado em 24 de abril de 2006. Este trabalho foi apoiado pelo Ministério da Educação e Ciência espanhol.

E. Fullana, V. Castillo, C. Cuenca, A. Ferrer, E. Higon, J. Poveda, A. Ruiz-Martinez, B. Salvachua, C. Solans e J. Valls estão no Instituto de Física Corpuscular, IFIC (UV-CSIC), E-46071 Valencia, Spain (e-mail: Esteban.Fullana@ific.uv.es).

J. Castelo, C. Iglesias, and A. Munar were with the Instituto de Física Corpuscular, IFIC (UV-CSIC), E-46071 Valencia, Spain.

R. Teuscher estava na Universidade de Chicago, Chicago IL 60637 EUA. Ele agora trabalha no Instituto Canadense de Física de Partículas (IPP), Universidade de Toronto, Toronto, ON M5S 1A7, Canadá (e-mail: teuscher@physics.utoronto.que).

Versão colorida das Figs. 1–4 estão disponíveis online em <http://ieeexplore.ieee.org>. Identificador de Objeto Digital 10.1109/TNS.2006.877267

Apresentamos um algoritmo, denominado Filtragem Ótima (OF) algoritmo, para reconstruir amplitude, informações de tempo e pedestal de um sinal PM. O algoritmo também fornece uma verificação de qualidade on-line para decidir em tempo real se os dados brutos devem ser adicionados ao fluxo de saída para realizar uma análise posterior. O algoritmo foi desenvolvido inicialmente para calorímetros de ionização líquida [3], seu desempenho em hadrônicos calorímetros é o objetivo da presente análise.

II. BASES TEÓRICAS

Vamos definir como um conjunto de valores da função de forma de pulso de o sinal, livre de ruído e normalizado para um em amplitude. Os valores são tomados em momentos cujo intervalo de tempo deve ser igual ao período de amostragem. As amostras podem assim ser Expresso como:

$$S_i = p + Ag(t_i + \tau) + n_i$$

onde S_i representa as amostras digitais, é a verdadeira amplitude do sinal, é responsável por uma fase entre a forma do pulso fatores e as amostras, é a contribuição do ruído e é o pedestal.

Podemos desenvolver em uma série de Taylor como:

$$S_i \simeq p + Ag(t_i) + A\tau g'(t_i) + n_i \\ = p + Ag_i + A\tau g'_i + n_i.$$

Observe que o algoritmo usa uma aproximação de primeira ordem para a fase entre as amostras e os fatores de forma do pulso, pois a fase tende a zero quanto mais precisa a reconstrução. Portanto, é importante calcular os componentes como g mais próximo possível das posições das amostras dentro do sinal.

Vamos definir agora três quantidades:

$$u = \sum_{i=1}^n a_i S_i, \quad v = \sum_{i=1}^n b_i S_i, \quad w = \sum_{i=1}^n c_i S_i$$

onde n é o número de amostras e a_i, b_i, c_i são parâmetros livres do algoritmo denominado pesos OF.

Definimos agora duas condições:

- Os valores esperados de u, v e w para $\langle u \rangle, \langle v \rangle, \langle w \rangle$ m eventos de igual amplitude, tempo e pedestal devem ser iguais para $A, A\tau$ e respectivamente.
- As distribuições e os valores u, v, w são amplamente afetados pelo barulho. Exigimos os parâmetros e para serem calculados para que minimizem as variações de u, v, w .

O desenvolvimento teórico do algoritmo assume um ruído estacionário, ou seja, as médias estatísticas dos termos de ruído devem ser independente do tempo, caso contrário o algoritmo não é válido.

Com estas condições e usando os multiplicadores de Lagrange método - para minimizar uma função que impõe restrições - nós obter três conjuntos de equações e incógnitas.

Os três sistemas de equações são lineares (devido ao Taylor's expansão) e suas soluções são os parâmetros e (em [3] encontramos os detalhes da resolução para equações e não sabe):

$$\begin{pmatrix} R_{11} & R_{12} & \dots & R_{1n} & g_1 & g'_1 & 1 \\ R_{21} & R_{22} & \dots & R_{2n} & g_2 & g'_2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ R_{n1} & R_{n2} & \dots & R_{nn} & g_n & g'_n & 1 \\ g_1 & g_2 & \dots & g_n & 0 & 0 & 0 \\ g'_1 & g'_2 & \dots & g'_n & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & \dots & 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_n \\ \lambda \\ \kappa \\ \epsilon \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

onde a_i e g'_i são os valores da forma do pulso e sua derivada respectivamente, são os pesos OF (o sistema para e os pesos são idênticos, apenas o termo independente muda), $\lambda, \kappa, \epsilon$ são os multiplicadores de Lagrange e são termos da matriz de autocorrelação de ruído que pode ser calculada por:

$$R_{ij} = \frac{\sum (n_i - \langle n_i \rangle)(n_j - \langle n_j \rangle)}{\sqrt{\sum (n_i - \langle n_i \rangle)^2 \sum (n_j - \langle n_j \rangle)^2}}$$

onde estão as amostras de ruído.

Portanto, o algoritmo OF reconstrói a amplitude, informações de fase e pedestal a partir de somas ponderadas do amostras:

$$A = \sum_{i=1}^n a_i S_i, \quad A\tau = \sum_{i=1}^n b_i S_i, \quad p = \sum_{i=1}^n c_i S_i.$$

Para verificar a qualidade da reconstrução definimos um fator de qualidade χ :

$$\chi = \sum_{i=1}^n \text{ABS}((S_i - p) - Ag_i).$$

Usamos a fórmula do valor absoluto em vez do quadrado porque é mais rápida de implementar nos DSPs ROD. Observe que quando o tempo de cálculo é limitado, como no TileCal ROD, o cálculo não é necessário, uma amostra sem sinal é suficiente já que o fator pretende ser apenas um estimador da qualidade de a reconstrução.

III. IMPLEMENTAÇÃO NO CALORÍMETRO DE TELHA ATLAS

Os pesos são calculados offline e usados no evento online por evento. Para calcular os pesos, o ruído e a forma a função deve ser compreendida.

A matriz de autocorrelação de ruído é calculada forçando gatilhos sem sinal. Nesta análise a autocorrelação de ruído matriz é definida como matriz unitária devido à pequena correlação

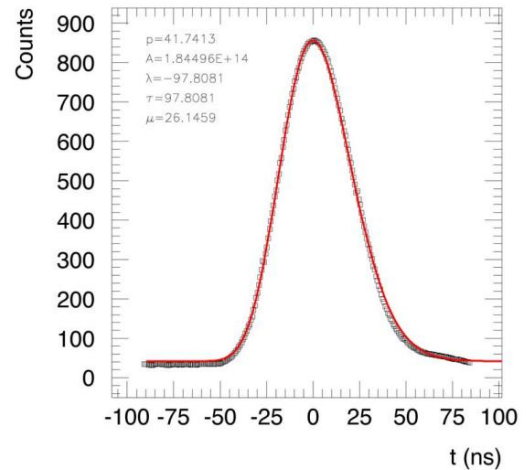


Figura 1. Forma de pulso reconstruída com eventos de injeção de carga (quadrados brancos) e função ajustada ao formato do pulso reconstruído (linha sólida). A figura imprime os valores dos parâmetros de ajuste.

encontrado na eletrônica TileCal. No entanto, uma vez que o LHC esteja operacional, a correlação deve ser corrigida devido ao efeito da engavetamento produzido em cada colisão no LHC.

A forma do pulso é reconstruída usando a injeção de carga sistema que faz parte da eletrônica front-end do TileCal. Esse O sistema injeta carga diretamente no modelador emulando um PM. O as cargas injetadas variam entre zero e 800 pC e o tempo de início da injeção varia para cobrir o período de amostragem de 25 ns. Portanto, o sistema varre toda a faixa do sinal, permitindo-nos obter um conjunto de valores numéricos que definem a forma do pulso. Nós nos encaixamos uma função analítica para os valores numéricos obtidos a partir do sistema de injeção de carga para eliminar o ruído eletrônico frontal na forma de pulso. Usamos a função:

$$\text{SF}(t) = p + A \left(\frac{t - \lambda}{\tau} \right)^\mu \exp \left(-\mu \frac{t - \lambda}{\tau} \right)$$

que se ajusta ao formato de pulso do sinal TileCal PM. Figura 1 gráficos os valores numéricos versus o tempo (quadrados brancos) e o função ajustada (linha sólida) e imprime os valores dos parâmetros obtido após o ajuste. As amostras são calculadas a partir deste função uma vez que é normalizado para um em amplitude.

O algoritmo OF precisa que as amostras estejam dentro de um estreito intervalo de tempo a partir do tempo de referência dos pesos OF (definido pelo posições de tempo onde são calculadas). Contudo, se os acontecimentos não chegam sincronizadamente ao detector a fase entre as amostras e os componentes mudam evento por evento. O o problema é resolvido aplicando os pesos adequados para cada evento de acordo com a posição das amostras no sinal. Em ordem para fazer isso calculamos 25 conjuntos de pesos, um para cada tempo de experiência -25 referência e 25 ns em passos de 1 ns varrendo todos entre o sinal. O problema passa a ser, portanto, descobrir a posição das amostras no sinal, a fim de escolher o apropriado pesos. As informações de fase fornecidas pelo algoritmo OF pode ser usado para iniciar um processo de iteração. Os critérios de convergência são definidos exigindo a fase relativa da última iteração

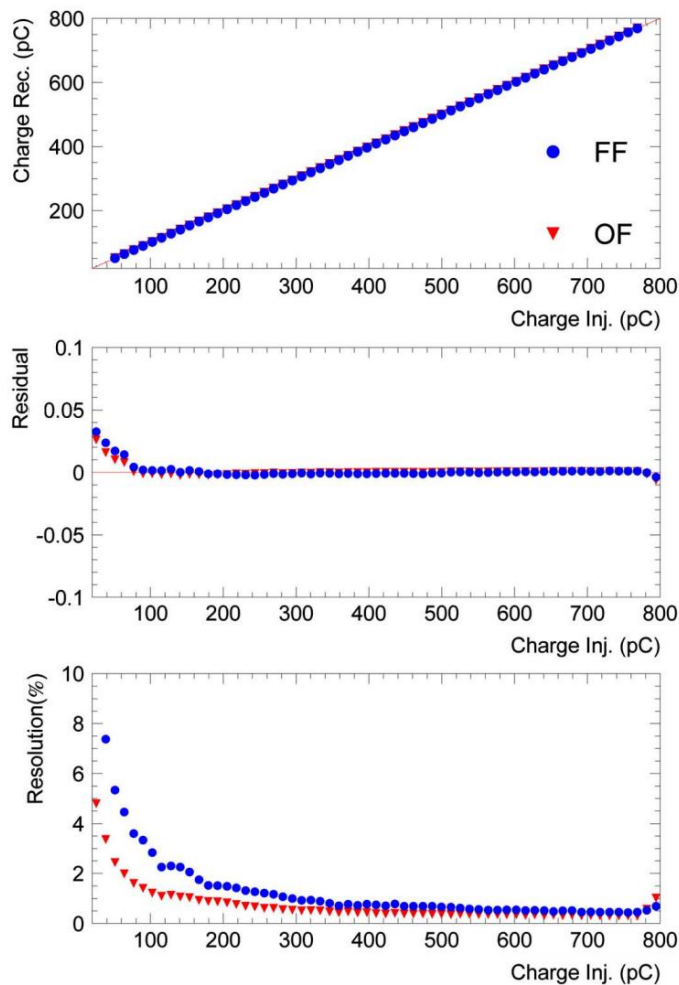


Figura 2. Reconstrução de amplitude para algoritmo de filtragem ideal (OF) e plano Algoritmo de filtragem (FF) em eventos de injeção de carga.

ser inferior à metade do intervalo de tempo entre o conjunto de pesos. O processo de iteração é limitado pelo tempo de computação disponível, em no nosso caso, o sincronismo do ATLAS-LHC nos impede de implementar iterações. Porém a chegada dos acontecimentos na configuração do qual adquirimos os dados utilizados nesta análise eram assíncronos, portanto implementamos iterações.

4. RESULTADOS

Testamos o algoritmo usando dois tipos de dados: dados de injeção de carga e dados físicos. A carga injetada na carga O sistema de injeção varia entre zero e 800 pC e o tempo de início da injeção varia para cobrir o período de amostragem de 25 ns. Esses características permitem testar o desempenho do algoritmo em ambos, amplitude e tempo, para todas as cargas disponíveis.

A Figura 2 mostra os resultados do algoritmo para reconstrução de amplitude. Os resultados são comparados com a Filtragem Plana algoritmo (FF) que consiste em uma soma simples das amostras. O gráfico superior mostra a carga reconstruída versus a carga injetada cobrar por toda a gama de cobranças, ambas em picocoulombs. Para cada carga injetada, reconstruímos eventos a 200 ps. Os pontos representam a média da distribuição da carga reconstruída para cada carga injetada.

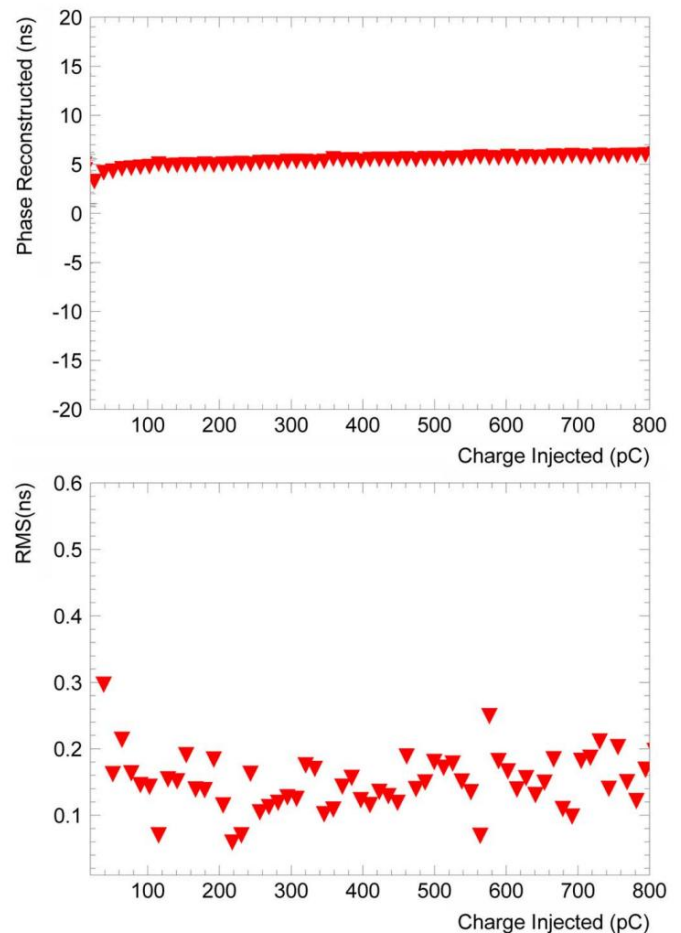


Figura 3. Reconstrução de tempo para algoritmo de Filtragem Ótima em injeção de carga eventos.

O gráfico do meio representa o resíduo dos pontos para a linha que divide o gráfico ao meio. Ambos os gráficos mostram que ambos os algoritmos produz em média uma carga reconstruída correta. O fundo O gráfico mostra a resolução da reconstrução versus a carga injetada. A resolução é definida como a razão entre o desvio padrão e a média da distribuição da carga reconstruída. O gráfico mostra a diferença entre o Algoritmo FF e o OF. A resolução em alta injetada cobranças são semelhantes para ambos os algoritmos, porém como o injetado a carga diminui o algoritmo OF traça uma melhor resolução. Esse é uma consequência dos conceitos básicos do OF, o algoritmo é projetado para minimizar o impacto do ruído na resolução que é mais importante em cargas baixas, onde a relação sinal-ruído é pequeno.

A Figura 3 mostra os gráficos para a reconstrução temporal do OF algoritmo. A fase entre as amostras e os valores foi g fixado em 5 ns. O gráfico superior mostra a média do reconstruído distribuição de fase e o gráfico inferior mostra seu desvio padrão em relação à carga injetada para toda a faixa de cargas injetadas. Observe que a fase está bem reconstruída para toda a gama de cargas com precisão de 200 ps.

A Figura 4 mostra os gráficos do fator de qualidade, q , do algoritmo OF. O gráfico mostra que para a maior parte da faixa de carga injetada a reconstrução só é boa com cargas injetadas muito baixas. a reconstrução começa a ser menos fiável.

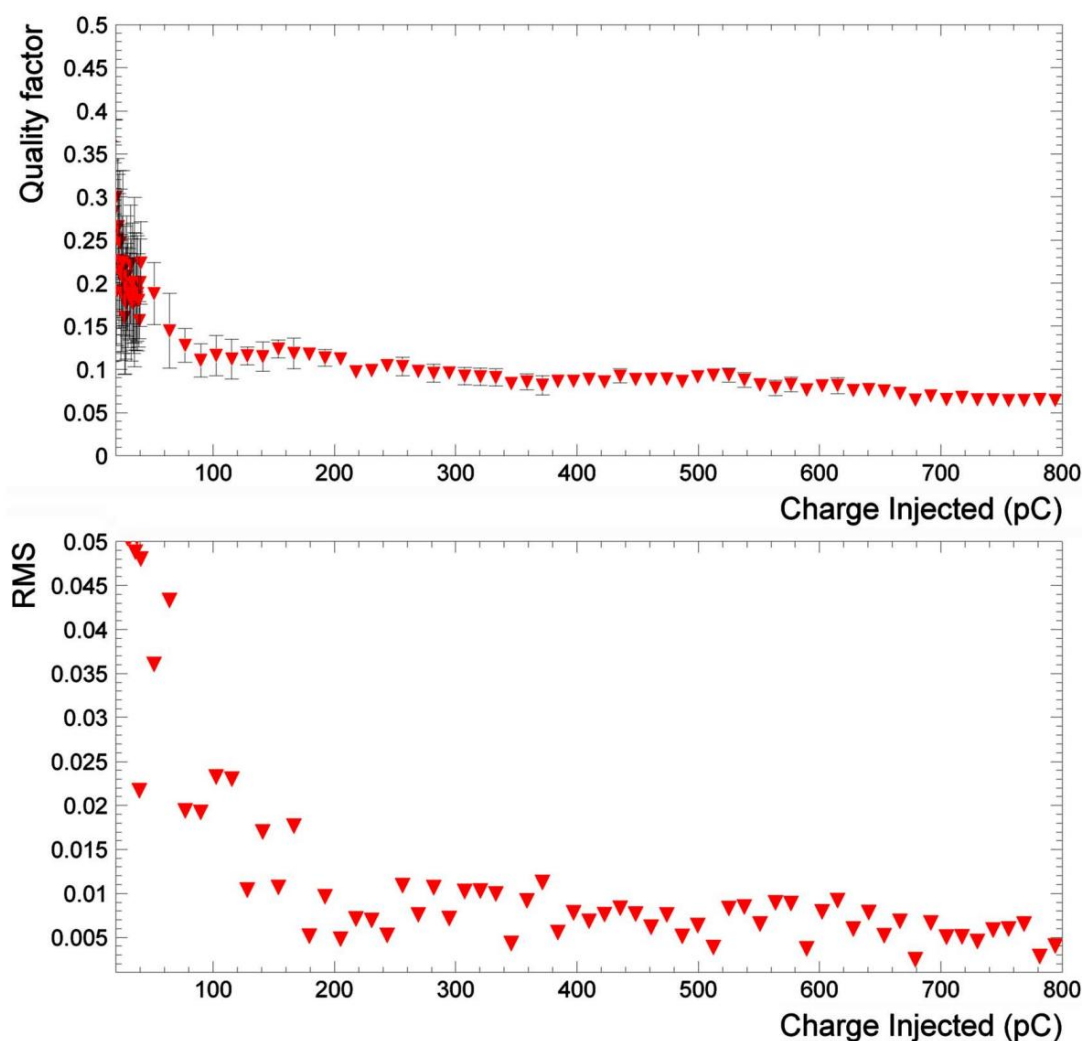


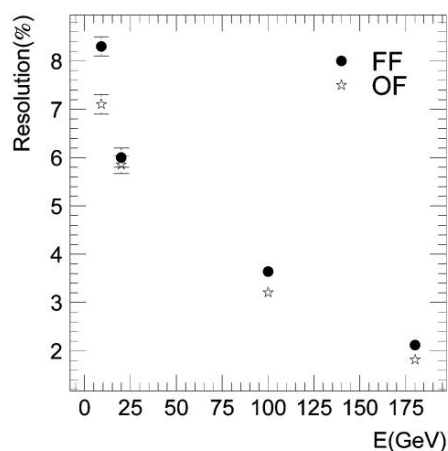
Figura 4. Média dos fatores de qualidade do algoritmo Optimal Filtering versus carga injetada.

Observe que a reconstrução temporal ajuda a rejeitar antecedentes e o fator qualidade é importante para monitorar online a qualidade da reconstrução e tomar decisões online sobre os dados a serem enviados para a próxima etapa da cadeia de aquisição.

Para os dados físicos usamos píons e elétrons de diversas energias. Os dados foram obtidos durante períodos de teste usando o acelerador SPS nas instalações H8 CERN. A energia total depositada no calorímetro é calculada somando a amplitude reconstruída em todos os canais multiplicada por uma constante de calibração.

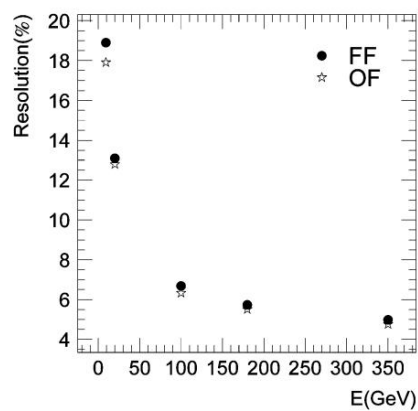
Ajustamos uma distribuição gaussiana à energia depositada no calorímetro. A resolução do calorímetro é definida aqui como a razão entre o sigma e a média da distribuição.

A Figura 5 mostra as resoluções obtidas com o algoritmo OF e FF versus o momento do elétron incidente. Tal como no caso da injeção de carga, a melhoria do algoritmo OF manifesta-se em baixas energias, onde a relação sinal-ruído é pequena e o ruído degrada significativamente a resolução. A Figura 6 compartilha o mesmo resultado, agora as resoluções são em geral piores do que no caso dos elétrons devido às flutuações intrínsecas da chuva desenvolvida pelos píons, mas novamente o algoritmo OF melhora a resolução em baixas energias. Observe que as diferenças entre as medições FF e OF na resolução TileCal são



5. Resolução energética do detector TileCal obtida com o algoritmo Optimal Filtering (OF) e Flat Filtering (FF) versus o momento dos elétrons incidentes.

não é muito significativo em geral para eventos de física. O ponto importante é que o OF apresenta melhorias significativas nas regiões onde o ruído está degradando a resolução, o que é um



6. Resolução energética do detector TileCal obtida com o algoritmo Optimal Filtering (OF) e Flat Filtering (FF) versus o momento dos píons incidentes.

resultado promissor face ao futuro aumento global do ruído devido aos eventos de acumulação do LHC.

V. CONCLUSÃO

O algoritmo Optimal Filtering foi testado satisfatoriamente em dois tipos de dados. Para os dados obtidos com injeção de carga

executa a reconstrução está correta tanto para amplitude quanto para tempo. Ao mesmo tempo, o algoritmo melhora a resolução, em comparação com algoritmos de filtragem simples, quando a relação sinal-ruído é pequena. Este resultado é compartilhado em execuções físicas realizadas durante os períodos de calibração física do detector. Portanto os resultados são promissores para que o algoritmo OF seja um bom candidato para reconstruir online a energia do Calorímetro de Telha quando o LHC estiver operacional.

RECONHECIMENTO

Os autores gostariam de agradecer a contribuição de B. Cleland por seus sábios conselhos e por compartilhar seu amplo conhecimento sobre análise de sinais, e expressar gratidão a R. Leitner, B. Stanek, T. Davidek e às pessoas envolvidas no TileCal detector, especialmente aqueles que contribuíram para a aquisição de dados e período de calibração do feixe de teste. Os autores agradecem também a C. Bohm pelo incentivo para apresentar este trabalho.

REFERÊNCIAS

[1] C. Atlas, Tile Calorimeter Tech. Design Rep., CERN, Genebra, Suíça, CERN/LHCC 96-42, 1996.
[2] J. Castelo, "Requisitos de hardware e software TileCal ROD", *Nota interna da ATLAS*, 2005, CERN-ATL-TILECAL-2005-003.
[3] WE Cleland e EG Stern, "Considerações de processamento de sinal para calorímetros de ionização líquida em um ambiente de alta taxa", *Nucl. Instrum. Métodos Física. Res. A*, vol. A338, pág. 467, 1994.