Analisi dei modelli di programmazione matematica per la gestione ottimale della congestione dello spazio aereo

1 - Modelli in letteratura.

**Bertsimas and Stock-Patterson 1998**

L’articolo presenta un modello per ATFM (air traffic flow managment) che mira ad aumentare l’efficienza (efficiency) del sistema minimizzando il costo totale del ritardo di tutti i voli. Questo lavoro è stato utilizzato come base di partenza per evoluzioni e perfezionamenti del modello in varie pubblicazioni successive.

**Bertsimas et al. 2011**

Riprende il modello Bertsimas and Stock-Patterson (1998) e fornisce un modello che permette rerouting, ground holding, airborne holding e speed control. Implementa rerouting senza aumentare il numero delle variabili ma solo con vincoli aggiuntivi. La funzione obiettivo presenta dei coefficienti di costo super-lineari per aumentare l’equità (equity).

Il modello APCDM di Sherali et al. (2003,2006) viene definito come complementare in quanto considera una dimensione più locale del problema ma la rappresentazione e la pianificazione delle traiettorie sono trattate con un grado di dettaglio ben più elevato.

**Bertsimas and Gupta 2016**

Riprende il modello Bertsimas and Stock-Patterson (1998) e incorpora considerazioni sulla correttezza (fairness) generalizzando i principi della strategia RBS controllando il numero di “reversal” e di “overtaking”. Introduce la possibilità per le compagnie di proporre un’offerta per lo scambio di slot di tipo AMAL (Vossen and Ball 2006, Sherali et al. 2011).

Funzione obiettivo variante adattata di quella usata in Bertsimas et al. (2011).

**Barnhart et al. 2012**

Riprende il modello Bertsimas and Stock-Patterson (1998) e sviluppa una metrica per la correttezza (fairness) che misura lo scostamento dal caso FSFS (first-scheduled, first-served). Introduce due approcci di ottimizzazione del trade-off fra correttezza (fairness, calcolata con la metrica definita) ed efficienza (efficiency, calcolata come il ritardo totale del sistema). Il primo dei due modelli utilizza un’approssimazione della metrica, il secondo introduce l’utilizzo di penalità di ritardo a crescita esponenziale e comporta notevoli vantaggi computazionali a discapito di un leggero peggioramento in termini di correttezza rispetto alla metrica definita.

**Lulli and Odoni 2007**

Presenta modello per il sistema europeo EU ATFM che può essere visto come “versione macroscopica” del modello Bertsimas and Stock-Patterson (1998) ed evidenzia le criticità che derivano dalla natura di network del modello EU ATFM (insieme di ATM system di stati differenti) in termini di compromesso fra efficienza ed equità.

**Sherali et al. 2011**

Estende APCDM (airspace planning and collaborative decision-making model) sviluppato da Sherali et al. (2003,2006) includendo la gestione delle FCA (flow constrained area) e soprattutto il meccanismo AMAL (Vossen and Ball 2006) per lo scambio di slot.

Definisce tre diverse misure per l’equità:

* EM1 ripresa dal modello precedente, considera i costi totali di carburante e ritardo
* EM2 considera il ritardo medio realizzato per passeggero
* EM3 basata su un indice binario di “on-time performance”.

**Vossen and Ball 2006**

Introduce il meccanismo AMAL (at-most, at-least) per lo scambio di slot. Un’offerta AMAL è nella forma (f1, t1; f2, t2), che significa che la compagnia è disposta a spostare il volo f1 in uno slot successivo, ma non più tardi di t1; in cambio vuole spostare il volo f2 in uno slot precedente non più tardi di t2.

2 – Confronto con UDPP

UDPP (user driven prioritization process) utilizza il meccanismo SFP (selective flight protection) che opera attraverso lo scambio degli slot e il riordino delle partenze. Il fulcro dell’algoritmo è la sospensione di alcuni voli che comporta il guadagno di crediti OC (operating credit) che possono essere spesi per minimizzare il ritardo di altri voli (protection). Il numero di voli che un utente può proteggere dipende dal grado di congestione del sistema e dal numero di crediti che ha accumulato.

Questo tipo di approccio risulta differente da quanto presente in letteratura.

Il modello Bertsimas and Stock-Patterson (1998) e il modello Sherali et al. (2011) introducono un meccanismo di scambio di slot di tipo AMAL che risulta però differente da quello concepito in UDPP sia dal punto di vista concettuale che da quello tecnico.

Concettualmente l’approccio AMAL consente di effettuare scambi di slot di tipo uno a uno assegnando implicitamente lo stesso valore a tutti gli slot, in UDPP invece si parte proprio dall’assegnazione di un valore OI (operating index) agli slot in base al grado di congestione dell’hotspot per determinare il numero di crediti necessari alla protezione di un volo.

La tecnica dei crediti svincola completamente sospensione e protezione dei voli dal rapporto 1 a 1 e anche da qualsiasi legame temporale (i crediti possono essere spesi per proteggere dei voli in hotspot futuri).

Dal punto di vista tecnico il modello Sherali et al. (2011) definisce i possibili scambi di slot tramite grafi orientati in cui gli scambi validi sono dei circuiti mentre in UDPP è possibile modellizzare il problema SFP come un problema di assegnazione fra voli e slot.

La variante del modello definita in Barnhart et al. 2012 non include la possibilità per le compagnie di effettuare offerte di scambio quindi da questo punto di vista risulta distante dall’idea centrale in UDPP.

3 – Costi (?legato a UDPP o solo scelta nella tesi?)

La definizione dei costi derivanti dal ritardo dei voli è sostanzialmente diversa fra i modelli statunitensi e quelli europei.

Nella letteratura americana appare consolidata l’idea di modellizzare i costi come combinazione dei costi derivanti da ritardo a terra e dei costi derivanti da ritardo in aria, con i secondi pesati in maniera maggiore rispetto ai primi.

In Cook et al. (2009) i costi per il sistema europeo sono modellizzati come composti da una componente hard di tipo costo per passeggero per ora di ritardo e una parte soft più difficile da quantificare che tiene conto dei costi indiretti.

Barnhart, C., Bertsimas, D., Caramanis, C., & Fearing, D. (2012). Equitable and efficient coordination in traffic flow management. Transportation Science, 46(2), 262-280.

Bertsimas, D., Gupta, S. (2016). Fairness and collaboration in network air traffic flow management: an optimization approach. Transportation Science, 50(1), 57-76.

Bertsimas, D., Lulli, G., Odoni, A. (2011). An integer optimization approach to large-scale air traffic flow management. Operations research, 59(1), 211-227.

Bertsimas, D., Stock-Patterson, S. (1998). The air traffic flow management problem with enroute capacities. Operations research, 46(3), 406-422.

A. Cook, G. Tanner, R. Jovanovic, A. Lawes, The cost of delay to air transport in Europe - quantification and management, 13th Air Transport Research Society (ATRS) World Conference, 27-30 June 2009, Abu Dhabi, United Arab Emirates, Paper No. 107

Lulli, G., A. Odoni. 2007. The European air traffic flow management problem. Transportation Sci. 41(4) 431–443.

Sherali, H. D., Hill, J. M., McCrea, M. V., Trani, A. A. (2011). Integrating slot exchange, safety, capacity, and equity mechanisms within an airspace flow program. Transportation science, 45(2), 271-284.

Vossen, T., Ball. M. O. (2006). Optimization and mediated bartering models for ground delay programs. Naval Research Logistics 53(1) 75–90.