

# 衛星通信システムにおける最適化手法の利用

水池 健

## 1. まえがき

商用衛星通信が1965年アーリ・バード衛星によって開始されて以来、衛星通信は欠くことのできない通信手段としてめざましい発達をとげてきた。今日では、国際通信や国内通信の各種サービスのため、数多くの通信衛星が打ち上げられている。また、個々の衛星も大容量化や高性能化が進んでいる [1]。衛星通信システムがこのように大規模かつ複雑になるにしたがって、システムの設計や運用を最も効率よく行なうことが次第に重要な課題になってきた。特に近年は、通信システムとしての経済性も求められている。このような状況から、衛星通信の分野においてもさまざまな最適化問題が取り上げられ、数学的最適化手法が問題解決の有効な手段の1つとなっている。たとえば、衛星通信で使用可能な衛星軌道や周波数を有効利用するための方策 [2] に対して、数学的な最適化モデルの適用が試みられ、良好な結果が得られている。またマルチビーム衛星と呼ばれる高度な通信衛星の高効率運用方法の策定等の問題においても数学モデルによる解法が各種開発されている。その中には、マルチビーム衛星の多数の中継器を用いて最も効率よく回線を設定する方法を、混合整数計画問題により決定した例もある [3]。本稿では衛星通信固有の問題に対して数学的な最適化手法が有効に利用されている事例をいくつか紹介し、この分野における有用性を明らかにする。

## 2. 静止軌道と周波数の有効利用

現在利用されている通信衛星の大部分は静止衛星軌道と呼ばれる赤道上約 36,000km の円軌道に配置されており、その数も衛星通信の普及に伴い急増している。一方、衛星通信には電波の周波数が 6/4GHz, 14/11GHz 等であるマイクロ波が主として用いられている。国際的

みずいけ たけし

国際電信電話株 目黒研究所 衛星通信システム研究室  
〒153 目黒区中目黒2-1-23

な取り決めにしたがって、あらかじめ決められた周波数帯が多くシステムで共用されている。このため無線通信で普遍的に見られる電波干渉が避けられず、この制約の下で限られた静止軌道のスペースや周波数帯を有効利用することが重要な課題となってきた。

### 2.1 衛星軌道位置の最適決定 [4]

静止衛星軌道上で衛星位置 (経度)  $\theta_x$  と  $\theta_y$  に配置された2つの衛星 X と Y が同一周波数を用いる場合、図 1 に破線で示したように互いに干渉を与えあう。これは地球局のアンテナが狙った衛星方向以外にも電波を送受信してしまうためである。衛星方向から角度  $\phi$  離れた方向におけるアンテナの利得  $G$  は一般に角度  $\phi (>1^\circ)$  の関数となり、式(1)により表わされる。

$$G(\phi) = 32 - 25 \log \phi \text{ (dB)} \quad (1)$$

したがって、軌道位置が  $\theta_x$  である衛星 X を狙ったシステム X の地球局アンテナが軌道位置  $\theta_y$  にある衛星 Y の方向に有する利得  $G$  は、 $\phi \cong |\theta_x - \theta_y|$  とすれば(2)となる。

$$G(\phi) = 32 - 25 \log |\theta_x - \theta_y| \text{ (dB)} \quad (2) \\ = 10^{0.2 * |\theta_x - \theta_y|^{-2.5}} \text{ (真数)}$$

このためシステム X がシステム Y から受ける干渉による希望電波の電力と妨害電波の電力の比  $C/I$  (真数) は(3)式により表わされる。ここで  $P_{XY}$  は角度に依存しない定数であり、システム X の希望電波とシステム Y の妨害電波の各送信電力およびその他のパラメータから求められる。

$$(C/I)_X^{-1} = P_{XY} |\theta_x - \theta_y|^{-2.5} \quad (3)$$

軌道に  $N$  個の衛星が配置されているとシステム X が他の  $(N-1)$  個の衛星から被る干渉による  $C/I$  (真数) は、自システム X 以外の衛星すべてから混入する干渉雑音量を積算することにより(4)として求められる。

$$(C/I)_X^{-1} = \sum_{\substack{Y=1 \\ Y \neq X}}^N P_{XY} |\theta_x - \theta_y|^{-2.5} \quad (4)$$

この  $C/I$  の値は所定の通信品質を維持するために、あらかじめ定められた規格値  $(C/I)_0$  (定数) 以上 (すなわち、 $(C/I)_X^{-1}$  が  $(C/I)_0^{-1}$  以下) であることが求められている。一方、静止軌道の有効利用の観点からは、 $1 \sim N$

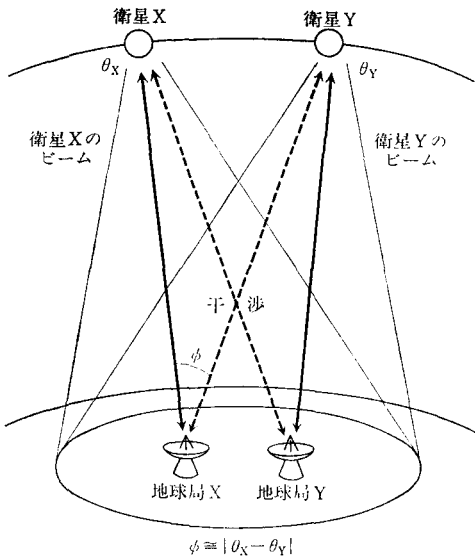


図1 衛星通信における干渉

の順に並んだ  $N$  個の衛星で占める軌道の長さ  $(\theta_N - \theta_1)$  をできる限り小さくすることが望ましい。この問題は式(5)のようにまとめられる。

$$\begin{aligned} & \text{Min}(\theta_N - \theta_1) & (5) \\ & \text{Subject to } \sum_{\substack{Y=1 \\ Y \neq X}}^N P_{XY} |\theta_X - \theta_Y|^{-2.5} \leq (C/I)_0^{-1} \text{ for all } X \end{aligned}$$

(5)の非線形計画問題は、非線形制約式を線形近似して得られるLPの最適解への方角を探索方向として反復収束させる方法あるいはSUMTにより解くことができる。このように  $N$  個の衛星の配置に要する軌道の長さを最小化することで、360度に限られた円軌道にできるだけ多数の衛星を収容することが可能となる。またモデルをさらに拡張し、各衛星を配置可能な軌道位置の範囲を示す制約を付加した定式化も可能である。

上記の定式化とこれにもとづいた計算機ソフトウェアがわが国で開発されており、ORBIT-IIプログラムと名づけられている。1985年と88年の2回にわたりスイスジュネーブで開催された世界無線主官庁会議 WARC-ORBにおいて、このプログラムは静止軌道の長期利用計画策定に利用された。その結果、先進国、発展途上国を問わず自国の通信衛星を打ち上げる軌道位置が保証されることとなった。

## 2.2 周波数割当の最適化 [5]

衛星通信において各地球局が送信する通信情報を担った電波をキャリアと呼び、個々のキャリアには所定の周波数が割り当てられる。図1の2つの衛星XとYでは、

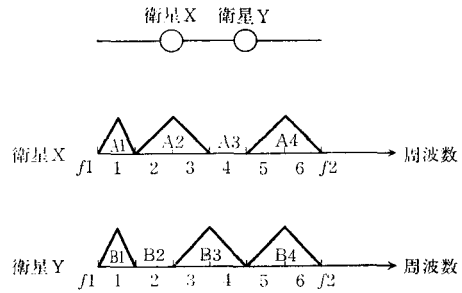


図2 キャリアの周波数割当

たとえば図2のようにキャリアの周波数が割り当てられる。同一の周波数に配置されたキャリア同士は互いに干渉を与えあうが、その影響はキャリアA4とB4のように完全に周波数を共用する場合に大きく、キャリアA2とB3のように重なりが少ない時には干渉量は小さくなる。このため各衛星では、限られた周波数帯域の中で互いの干渉量ができるだけ少なくなるようキャリア周波数を割り当てる必要がある。この周波数割当問題は、図2のように周波数帯域を一定刻みのセグメント(1~6)に分割し、キャリアの配置を対応するセグメントの並べ換えとして能率よく扱うことができる。一方のシステムXの周波数割当は固定とし、他方のシステムYのセグメントを並べ換えるものとする。システムXのセグメントとシステムYのセグメントを同一周波数に割り当てた時

		衛星 $j=1 \quad j=2 \quad j=3 \quad j=4 \quad j=5 \quad j=6$				
衛星		A1	A2	A3	A4	
衛星 X						
衛星 Y		A1	A2	A3	A4	
$i=1$	B1	43	27	(27)	0	39
$i=2$	B2	0	0	0	0	(0)
$i=3$	B3	39	36	28	(0)	45
$i=4$	B4	$\infty$	28	36	0	(21)
$i=5$	B4	(33)	40	11	0	57
$i=6$	B4	$\infty$	(11)	40	0	18

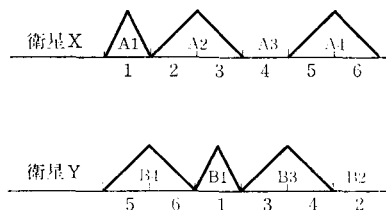


図3 干渉行列

に、対応するキャリアが互いに与えあう干渉量の大きい方を図3のように行列  $\{C_{ij}\}$  として取りまとめることにする。たとえばキャリア B1 をキャリア A1 と同じ周波数帯に割り当てた時の干渉量は要素  $C_{11}$  の値 43 として表わされる。

このように干渉量を行列として表現することにより問題をいわゆる割り当て問題として定式化できる。すなわち割り当てに伴うコスト(干渉量)の最悪値ができるだけ小さいセグメントの1対1割り当てを求めればよいことになる。この問題はボトルネック型割り当て問題として扱うことができる。図3の行列の○印をつけた要素がこの問題の解となる。その結果、システム Y のキャリアを並べ換えると行列の下に示したキャリアの割り当てが求められる。なおさまざまな帯域幅を有するキャリアを扱うために生ずる制約条件が付加された時には分枝限定法の利用により最適割り当てを求められる。

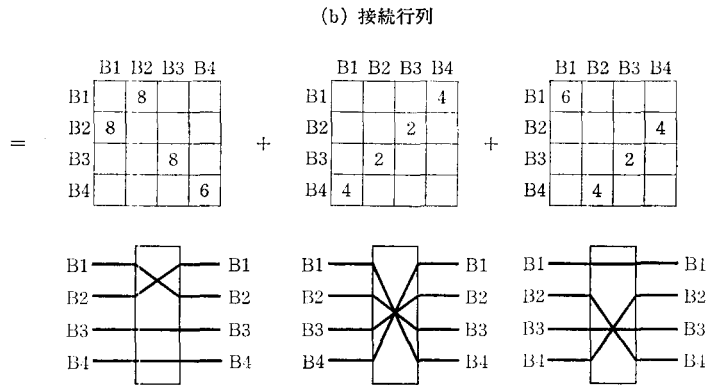
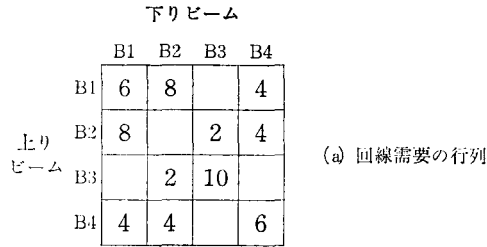
### 3. 通信衛星の効率的運用

マルチビーム衛星と呼ばれる通信衛星では衛星アンテナの送受信する電波をスポット状に絞った「ビーム」が使われる。複数のスポットビームを互いに分離させることにより同一の周波数を異なるビームで再利用できるため、衛星の通信容量の増大が図れることとなる。

#### 3.1 マルチビーム衛星のスイッチ切り替え [6]

$M$ 本のビームを有するマルチビーム衛星には、同一周波数帯に  $M$ 本の中継器が備えられている。地球局から衛星へ信号を伝送するための「上りビーム」 $M$ 本と地球局へ送り返すための「下りビーム」 $M$ 本は、衛星上のスイッチにより  $M$ 本の中継器を介して1対1接続される。上りビームと下りビームの各接続に対する通信需要は、多数の地球局間の回線需要を送受信地球局を各々カバーするビームの対毎に積算することにより、図4 a のように行列として表現できる。

限られた数の中継器で、多数の地球局間の回線を設定する手段として、TDMA と呼ばれる高能率伝送方式が近年導入されている。この方式では、所定の周期の時間帯を区分して多数の送受信局間の信号を順に交代して伝



スイッチ接続パターン of 総所要時間:  $T$   
 $T=8+4+6=18$

図4 スイッチ接続の切り替え

送している。TDMA 方式には、さらに衛星上のスイッチを所定の手順で切り替えて、 $M$ 本のビーム間の1対1接続を上記の周期の間で順に複数のパターン設定する運用方式(SS/TDMA)が適用できる。図4 a 図に示すさまざまなビーム接続に対する回線需要も、このようにビーム接続を順に切り替えることにより柔軟にさばくことが可能となる。ビームを1対1接続する1つのパターンは、図4 b のように各行各列に非零要素がただ1つである接続行列として表現される。すなわち接続行列の非零要素の表わすビーム同士を接続することにより、図4 b のように各接続行列に対応するスイッチ接続パターンが得られる。したがって、与えられた通信需要をすべて疎通させるためのビーム接続の切り替え方法は、図4 a の行列を図4 b のように接続行列の和として分解することにより決定できる。分解された各接続行列の最大要素の回線数を伝送するために必要な時間だけ、対応するスイッチ接続パターンは保持される。パターンを順に繰り返して通信需要をすべて伝送するための所要時間は各接続

行列の最大要素の和となる。衛星の中継器の容量の有効利用のためには、与えられた回線需要に対して伝送所要時間の総和  $T$  を最短にする必要がある。つまり図 4 a の行列を各接続行列の最大要素の総和が最小となるように接続行列の和に分解すればよいことになる。この問題にはわが国で有効な解法がはじめて提案されて以来、マッチング問題等を利用したさまざまな解法が開発されている。なお最短の総伝送時間  $T$  は、回線需要を示す行列の行和、列和の最大値で実現できることもわかっている。

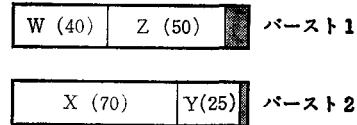
### 3.2 マルチビーム衛星の回線割当 [7]

TDMA と呼ばれる時分割伝送方式では、地球局間の回線は所定の周期で断続的に送信されるバーストと呼ばれる信号により設定される。1つのバーストには複数の対地宛での回線を収容できるが、運用の便宜上各対地宛での回線は1まとめにして1つのバーストで伝送しなければならない。このさい、1バーストの送信ごとに地球局の端局装置はインタフェイス装置を1台要するので、この必要数を最小化するように回線の対地の組合せを最適決定する必要がある。ただし、バーストごとの最大回線数はこれを送信するインタフェイス装置の所定容量（たとえばここでは100回線）を越えられない。図5の例のように、送信局Aから4つの対地W、X、Y、Zにそれぞれ40、70、25、50回線の通信需要がある場合、バースト1に対地WとZ宛て回線を、またバースト2に対地XとY宛て回線を収容することにより、最小数2のバーストで伝送できる。この時バーストの回線総数はそれぞれ90と95であり、装置の容量以内である。この問題はビンパッキング問題として扱うことができる。すなわち、バーストあるいはインタフェイス装置が必要数を最小化すべき容器、各対地宛での回線需要が分割不可能な物質に相当する。

送信局Aの回線需要

受信局	W	X	Y	Z
回線数	40	70	25	50

インタフェイス装置（容量100回線）



バースト1の割当て可能時間帯

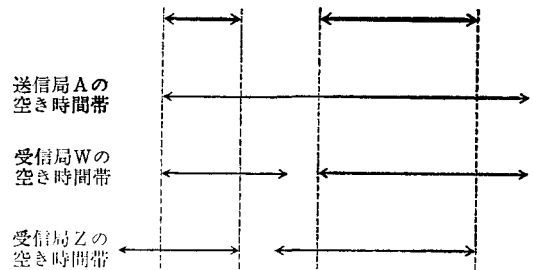


図5 バーストの構成と割当て可能時間帯

このようにして作成されたバーストは、衛星中継器において互いに衝突することのないような時分割により伝送されなければならない。また地球局はいくつかの中継器にバーストを伝送できるが、端局装置の変復調器は各々1台ずつだけであるために、バーストの送信局と受信局のいずれにおいても2つ以上のバーストが同時に伝送されることのないように、バーストの伝送タイミングを

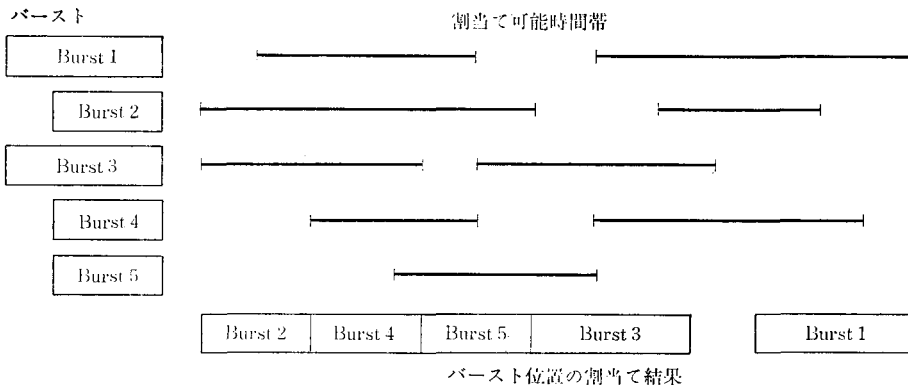


図6 バースト位置の割当

割り当てる必要がある。図6には、1本の中継器で伝送すべき5つのパーストに対して、他のパーストとこのような同時伝送の生じない割り当て可能時間帯が各々指定されている。たとえばパースト1が上記の構成である場合、その割り当て可能時間帯は、図5に示すように送信局Aが他のパーストを送信していない空き時間帯、および受信局W、Zのすべてが他のパーストを受信していない空き時間帯の共通部分（積集合）として定められる。ここでは、各パーストがそれぞれの割り当て可能時間帯内に含まれ、かつ互いに重なり合わないよう伝送時間帯（位置）を割り当てなければならない。この問題は開始時刻と完了時刻の制約付きスケジューリング問題として扱うことができる。図6の下には、上記の条件を満たすパースト伝送時間帯の割り当て結果が示してある。

#### 4. むすび

衛星通信は本格的実用化の時代を迎え、より効率的な利用が求められるようになった。これに伴い、システムの設計や運用において、本稿で紹介したようにさまざまな最適化問題が取り扱われている。最適化のモデルとしては、数値計画法や組合せ最適化等多様な手法が利用可能である。すでに数学的な最適化モデルにもとづいた計算機プログラムも各種開発されている。これらの計算機プログラムは衛星通信システムの設計や運用計画の立案に実用化されており、その有用性も広く認められるに至っている。このように数学的な最適化手法は、衛星通信

の分野においても今や欠くことのできない問題解決手段となっている。今後、衛星通信の一層の発展に伴いシステムが大規模化するにつれて、その有用性もますます高まるものと思われる。新たな問題に対して最適化モデルが有効に適用され、その結果、衛星通信システムの性能がさらに向上されるよう期待される場所である。

#### 参考文献

- [1] 野坂, 村谷:「衛星通信入門」, オーム社, 1988
- [2] 水池, 伊藤:「最適化手法の衛星通信システムへの応用」, 第6回数理計画シンポジウム論文集, 1985
- [3] 伊藤, 村谷:「多ビーム衛星におけるトランスポンダ・スケジューリング」, 電子通信学会論文誌, J 62-B, 4, pp. 360-367, 1979
- [4] 村谷他:「ORBIT-II プログラム」, 電子通信学会, 衛星通信研究会技術報告 S A T 83-2, 1983
- [5] 水池, 伊藤:「同一チャネル干渉軽減のための周波数最適割当て」, 電子通信学会論文誌, J 69-B, 9, pp. 921-932, 1986
- [6] 伊藤他:「SS/TDMA方式におけるタイムスロットの最適割当て」, 電子通信学会論文誌, J 61-B, 2, pp. 98-105, 1978
- [7] 水池, 伊藤:「SS/TDMAのためのパースト割当てアルゴリズム」, 電子通信学会論文誌, J 69-B, 11, pp. 1283-1294, 1986

#### ●研究普及委員会●

OR学会のなおいっそうの活性化をはかるため、以下の計画をしております。

1. 年度途中からの研究部会募集——従来、新しい研究部会は11月に応募を締切り、審査を経て4月から活動を開始することになっていましたが、年度の途中からでもスタートできる研究部会をいくつか設けます。研究普及委員会が念頭においていますのは“若手中心の研究部会”や“社会で注目を集めているような問題、たとえば、環境問題、都市問題、高齢化社会等に関する研究部会”等ですが、特に、分野は限定しません。OR学会員の皆様から広く募りたいと思います。
2. 平成2年9月23, 24日の早稲田での秋期研究発

表会で“OR情報交換室”のようなものを計画しております。研究者と実務家の間の情報交換を促進するのが主なねらいです。そのような計画に参加していただける方を募っております。大会中に時間と場所を設定しますので、ご都合のよい時間にきていただくこととなります。どのような形をとればよいかは今後煮詰めていこうと思います。

上記の2件についてご興味のある方、ご意見のある方はぜひ下記までご連絡ください。

〒152 目黒区大岡山2-12-1  
 東京工業大学理学部情報科学科 小島政和  
 電話 726-1111 内3201