

衛星伝搬の壺

第5講

陸上移動体を対象とする衛星伝搬問題

電気通信大学名誉教授
唐沢 好男

本シリーズでは衛星回線の電波伝搬に焦点を絞り、種々の伝搬現象のメカニズムやモデリングの壺を解説している。本講では人や自動車など陸上を動くものへの伝搬問題を取り上げる。移動伝搬の研究は地上系の通信で膨大な蓄積がある。地上系では、大きな電力的余裕を生かして基地局の見通し外エリアも漏れなくカバーするが、衛星通信では、原則、衛星に対する見通し内エリアに限られる。そのサービス環境に対する大きな制約条件が、陸上移動体衛星通信の伝搬問題を特徴的なものになっている。



陸上移動体衛星伝搬の特徴

このシリーズでは、自然現象を伝搬劣化要因とする降雨減衰とシンチレーション、海上運用で問題となる海面反射フェージングを取り上げてきた。本講では、陸上移動体との衛星通信 (LMSS: land-mobile satellite service) の伝搬問題を扱う。LMSS の伝搬は、これまで述べてきた不規則定常過程 (すなわち、現象が確率分布で表される) でモデル化できるものと違って、複雑な地形や人工構築物に対する非定常な伝搬になるので、一筋縄では行かない難しさがある。

このことは、地上系の移動通信 (LMS: land-mobile service) でも共通であるが、LMSS と LMS の伝搬モデルにはその適用に際して大きな違いがある。LMS では基地局と端末間の距離が短く、回線設計に電力的な余裕があるため、基本、基地局毎のサービスエリアは見通し外 (NLOS: non-line-of-sight) も含んだ面的にはほぼ一様なものになるが、LMSS では伝搬距離が長いことによる自由空間損が大きく、サービスエリアは主に見通し内 (LOS: line-of-sight)、あるいは、樹木など弱い遮蔽環境の準見通し内 (SLOS: semi-line-of-sight) に限られる。

図1は仰角32°にある衛星電波 (インマルサット太平洋衛星、周波数1.5GHz) を新宿のビル街を自動車で行きながら受信したときの受信強度の一例である [1]。図より、安定した受信状況 (① LOS)、不安定な状況 (② SLOS)、大きな劣化 (③ NLOS) が代わる代わる現れることが読み取れる。①、②を通信可能状態、③を不可状態とすると、高速移動体通信 (LMSS-V と呼ぶ) では、③状態による通信遮断が頻繁に起きるの

で、運用には無理な環境である。一方、端末が静止または低速移動での通信 (LMSS-P と呼ぶ) であれば、①、②の場所を選んで留まることができるので、通信サービスは可である。図2はこの説明を行っている。同じ地理的環境であっても、LMSS-P と LMSS-V では通信に対する影響度が異なり、稼働率評価の難しさがある。上記説明では、静止衛星 (GEO) の場合についてであったが、衛星位置が短時間で変わる低軌道衛星 (LEO) では、LMSS-P であっても、見通しの有無が時間と共に変わることになり、稼働率評価はより複雑である。こういう問題を避けるために、衛星通信は、周囲に遮蔽物がない見通しの良い環境、あるいは、市街地であればビルの屋上で、となってしまうと、利用に著しい制限をきたし、普及が難しくなる。

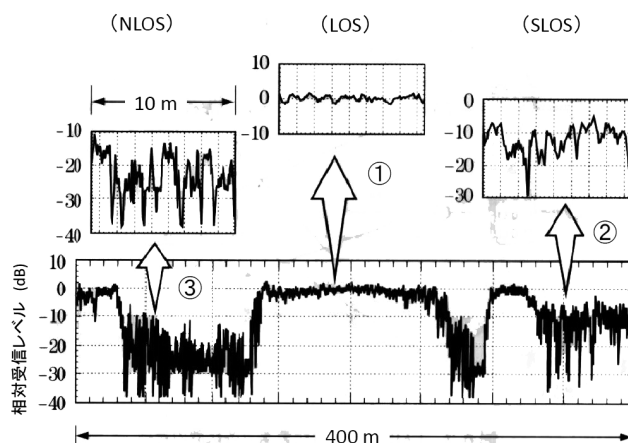


図1 市街地での衛星電波移動受信の例
(インマルサット太平洋衛星、周波数1.5GHz、仰角32°、場所:新宿)

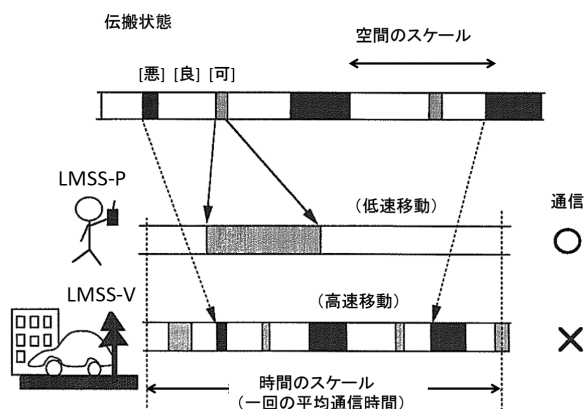


図2 通信品質視点で見る LMSS-V と LMSS-P の違い

👉 衛星見通し率

衛星通信では LOS 環境、あるいは、それに近い環境での運用が前提になるため、想定される環境における衛星見通し率の把握が必要になる。LMSS が始まろうとしていた 1990 年代には、様々な方法でこの見通し率の測定が行われた。自動車に指向性アンテナとラジオメータ（雑音温度測定装置）を搭載しての雑音温度測定（見通しがある方向では雑音温度が低い [2]）、太陽光を衛星電波に見立て、地面にできる影の比率を航空写真で調べる（目的は、衛星放送受信評価 [3]）、魚眼レンズカメラでの測定・解析 [4] など多彩な方法である。図 3 は市街地と郊外地における衛星見通し率の仰角特性について、上述の測定結果をまとめている [1],[5]。図より、例えば、市街地では、仰角 30° の衛星に対して、見通し率は 50% 程度であり、厳しい現実が理解できる。

このような、見通し率の悪いエリアでの運用を想定するならば、高仰角に少なくとも一基の衛星が存在するような衛星配置が求められる。一地点から見える衛

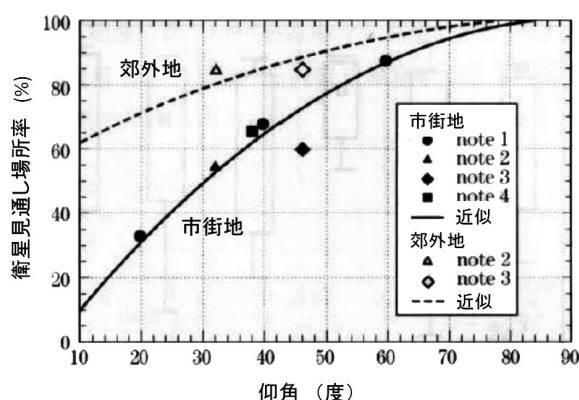


図3 市街地および郊外地における平均見通し率（=LOS 環境発生率）と衛星仰角の関係（データの詳細：note 1-4 は [5] 参照）

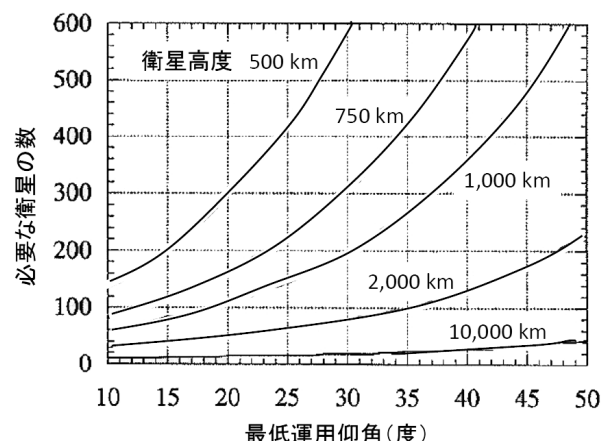


図4 衛星軌道高度に対する最低運用仰角と必要衛星数の関係

👉 伝搬モデル

図 1 にも示したように、LMSS の伝搬環境は多状態の複合モデルになるため、降雨減衰やシンチレーション、あるいは海面反射フェージングのように、一つの確率分布モデルで表すことができない。しかし、図 5 のように伝搬劣化の要素を切り分けてゆけば、その要素の組み合わせによって状態が定まり、状態ごとには確率分布モデルで表すことができる。

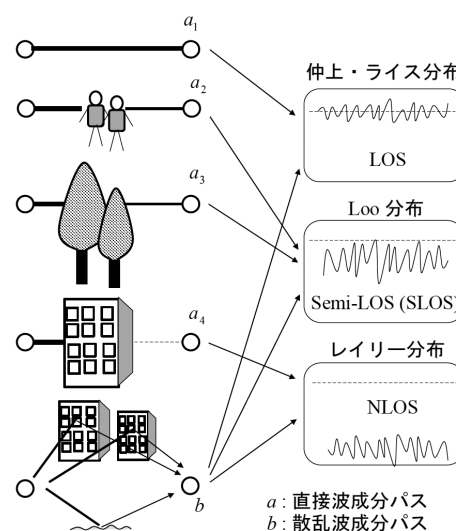


図5 LMSS 伝搬劣化要素と各状態の対応

例えば、見通しの良い LOS 環境では、直接波と周囲からの散乱波の合成となり、振幅変動は伸上・ライス分布が良い近似になる。また、直接波が完全に遮られてしまう NLOS 環境では、散乱波のみの集まりとなるため、レイリー分布で表されるであろう。その中間状態として、樹木等で直接波が若干の減衰を受ける環境については、すなわち、樹木が立ち並ぶ道路を自動車が行く場合のような環境では、図 6 に示すようなモデルが提案されている [6]。この場合は、直接波の信号レベルは対数正規分布、散乱波の信号はレイリー分布となり、受信信号はこの二つの成分の合成である。このモデルは、提案者の名を採って Loo モデルと呼ばれる。

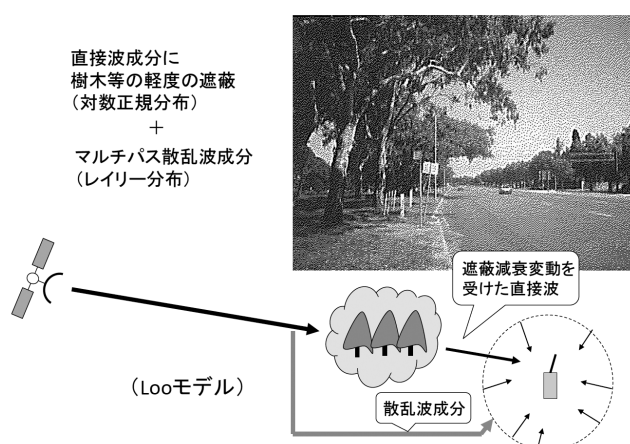
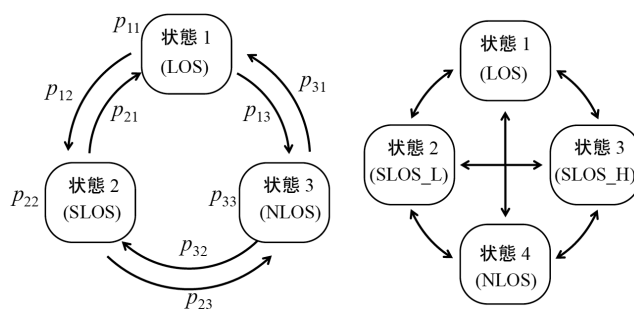


図6 直接波が樹木により弱い減衰変動を受ける環境 (Loo モデル) (写真はアデレードにて筆者撮影)

実際の総合的な伝搬環境は、図 2 で述べた運用形態 (LMSS-P や LMSS-V) や衛星配置 (GEO や LEO) によって、状態の現れ方が異なるため、その事情に応じた伝搬モデルが採用される。個々の状態の現れ方やそれぞれの状態におけるフェージングの程度はケースバイケースであるとしても、全体的に見ると多状態複合モデルで表される。図 7(a) は LOS/SLOS/NLOS で構成される 3 状態モデル、(b) は LOS/SLOS-L/SLOS-H/NLOS (SLOS の -L, H は直接波変動の程度の強 (H) 弱 (L) を区別している) の 4 状態モデルである。この各状態の発生確率 (と状態間の遷移確率) や平均持続時間を運用環境に応じて定めればよい [5],[7]。図 7 のような各状態間を遷移確率で結んで状態の推移を表すモデルはマルコフモデルと呼ばれる。3 状態モデルでも、パラメータ値を適切に合わせ込めば、図 8 に示すように、受信強度変動の実測データを正確に説明付けることができる [5]。

このように、LMSS 伝搬モデルも一般論ではすつき



(a) 3 状態モデル (p_{ij} : 状態遷移確率) (b) 4 状態モデル

図7 LMSS 伝搬環境を表す多状態マルコフモデル

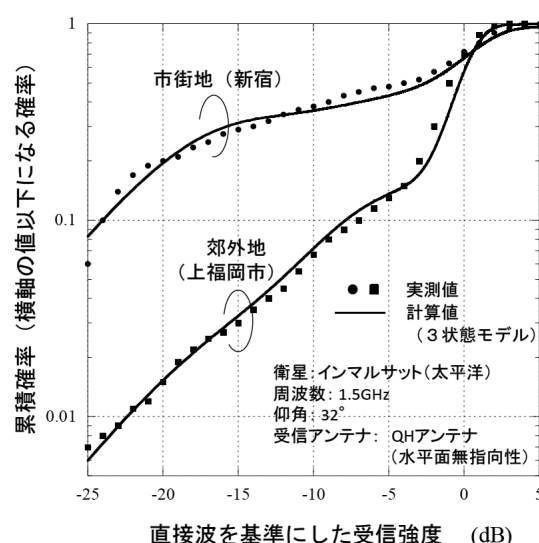


図8 市街地および郊外地での LMSS 伝搬実測データと 3 状態モデルによるフィッティング

りと整理できるが、具体的な回線設計をしたい場合には、現実環境 (運用形態も含めて) に多様な形があり、まだそれに十分応えられるほどの伝搬モデルはない (国際無線標準化組織の勧告: ITU-R P.681 [8] がそれを担うべきであるが、Good/Bad の 2 状態モデルに留まっている)。

高稼働率化技術

以上見てきたように、LMSS では伝搬路遮蔽が命取りになるので、高信頼サービス (いつでもどこでも誰とでも) が実現されている地上系の移動通信システム (LMS) のようにはいかない。特に、「どこでも」と言う部分においてである。そのため、LMSS は LMS を補完するものとして、例えば、そのインフラが未完の地域 (非居住地域や海上・離島) とか、戦争や非常災害時などの非日常的な場面への適用が主なものとなっていた。

これからの時代は、衛星通信単独でのサービスと言うよりは、移動通信の将来システムとして語られている地上系・衛星系が連携した臨機応変なシステムがその方向になろう。そのため、高稼働率化技術も、

①地上・衛星両系での役割分担によるもの（システムダイバーシチ）

②衛星系としての高稼働率化、例えば、衛星ダイバーシチなど

の両面での検討が必要になる。

ここでは、電波伝搬的視点から、上記②の衛星ダイバーシチについて少し触れたい。図4に示したように、衛星数に余裕を持った配置が実現できれば、複数の衛星を見通すことができるので、伝搬状態の良いリンクに切り替えながら通信を連続させることができる。この手法は衛星ダイバーシチ（あるいはリンクダイバーシチ）と呼ばれる [8]。図9に示すように各リンクの伝搬状態を把握して状態単位で切り替えてゆくのが現実的であろう。衛星軌道配置と運用環境を定めて、図7のマルコフモデルを適用すれば、稼働率改善の定量的な評価が可能である [5],[7]。

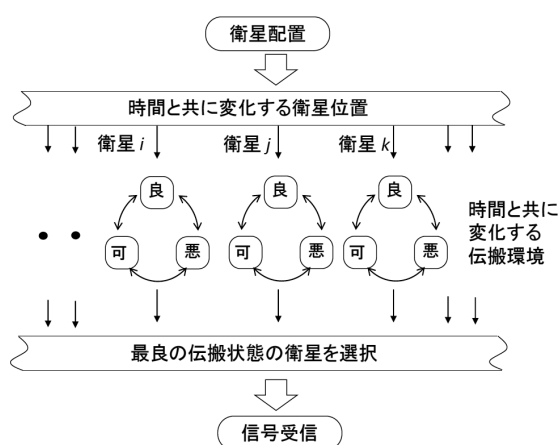


図9 非静止衛星通信システムにおける衛星ダイバーシチ

地上系通信伝搬モデルへの展開

本講では、LMSSの伝搬モデルを取り上げ、LMSとの違いは対象となる伝搬環境がLOS/SLOSであるかNLOSであるかであることを述べた。一方で、LSMのこれから（beyond 5Gや6G）においてはミリ波に代表されるより高い周波数の利用も想定されている。このような高い周波数では、自由空間損が大きくなり、かつ、遮蔽時の減衰量も大きくなるので、基地局（あるいはアクセスポイント）からの通信可能エリアはLOS/SLOS中心の運用になると考えられる。図

10のように、比較的限定された範囲を集中的に狙うイメージである。このような時代には、図5～図7で述べたLMSSの伝搬モデルがLMSS/LMS共通のモデルとして活用できるものと期待できる [7]。

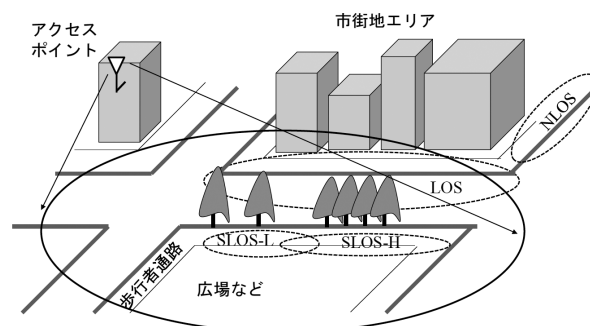


図10 ミリ波等利用地上移動通信系におけるLOS/SLOS環境想定サービスへの展開

ティータイム

衛星電話体験

1980年代、定期的に参加していた無線標準化の国際会議、海外から審議の報告や相談で日本に電話をかけた。料金や声の時間遅れが気になり、ただひたすらしゃべって、ガチャと切る。筆者にとっての国際電話にはそんな感覚が染み付いている。大学教員になった2000年ごろ、授業でパーソナル衛星通信を学生に体験してもらおうと、インマルサットの可搬端末（少し分厚いノートPCに受信器がついたイメージ）をレンタルし、大学構内での通話実験を試みた。GEO（インマルサット）はLEO（当時はイリジウム）と違って、衛星が見通せる場所がどこかにあればよく、そこを探して仰角や方位角の調整から始まるので、学生実習には最適である。

インマルサットの衛星電話は国際通信であり、ダイヤル0081（81は日本の国番号）の後、隣にいる友達の携帯電話が鳴るまでのちょっとした静寂がスリルである。3万6千キロ往復の0.3秒遅れが、会話に独特のテンポを生み出している。「田舎の親にかけてみる」、「留守番電話に残して記念にする」など、それぞれに楽しんでもらうことができた。料金という余計なことを気にする必要がなく、会話も無邪気である（もちろん、研究室にはしっかり請求が来た）。

「国際電話」、これはもうはだいが昔の感覚である。現在は国際通信の大部分が光海底ケーブルになり、衛星もLEOになると、会話の遅れがなく、普段の電話とほとんど変わりが無い。グローバルな時代である。

<参考文献>

- [1]伊藤泰彦(監), 低軌道衛星周回システム(その第6章: パーソナル衛星通信の電波伝搬), 信学会, 1999.
- [2]松戸孝他, “ラジオメータを利用した都市内での衛星・移動局間見通し場所率の測定,” 信学春大, B-19, 1993.
- [3]伊藤泰彦, “都市内での衛星放送移動受信における伝搬特性,” 信学論 (B-II), vol. J73-B-II, no.7, pp. 328-335, 1990.
- [4]R. Akturan and W. J. Vogel, “Elevation angle dependence of fading for satellite PCS in urban areas,” Elec. Letters, vol. 31, no. 14, pp.1125-1127, 1995. (rev 版: vol. 31, no. 25, 1995.)
- [5]Y. Karasawa, et. al, “Analysis of availability improvement in LMSS by means of satellite diversity based on three-state channel model,” IEEE Trans. VT, vol. 46, no. 4, pp. 1047-1056, 1997.
- [6]C. Loo, “A statistical model for a land mobile satellite link,” IEEE Trans. VT, vol. VT-34, no. 3, pp. 122-127, 1985.
- [7]Y. Karasawa, “A multi-state channel model composed of line-of-sight and semi-line-of-sight propagation environments for millimeter-wave mobile radio systems,” IEEE Trans. AP, vol. 69, no. 12, pp. 8731-8743, 2021.
- [8]ITU-R, “Propagation data required for the design systems in the land mobile-satellite service,” Rec. P. 681-11, 2019.