

令和 2 年 6 月 25 日現在

機関番号：82627

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K14688

研究課題名(和文)新しい空地伝搬測定手法としての航空機監視情報放送の活用

研究課題名(英文) Exploiting Aircraft Surveillance Information Broadcast as a New Means of Air-Ground Propagation Measurement

研究代表者

長縄 潤一 (Naganawa, Junichi)

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・電子航法研究所・主任研究員

研究者番号：40760400

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：ADS-Bは航空機が自らの位置などの情報を無線信号で放送するシステムである。本研究は、ADS-B信号を測定し、無線信号が空中を伝搬する現象(電波伝搬)の面から分析を試みるものである。分析結果は地上における受信局配置の設計などに活用できる。まず、ADS-B信号を用いるというアプローチはこれまでにないものであったため、その有効性を評価し、誤差要因への対策技術を開発した。その後、在空機の測定と分析を行い、受信電力分布の統計モデルを獲得した。また、山岳地帯における電磁界数値シミュレーションと測定の比較も行い、シミュレーション手法の評価結果や地形の影響に関する考察が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年、航空交通需要が増加しており、それを支えるインフラとして空と地上を結ぶ無線システム(例えば航空管制用の監視システム)の役割が高まっている。そのような無線システムを効果的に整備するには、空地を結ぶ無線信号の性質(電波伝搬)を理解することが必須である。これに向け、本研究では、ADS-B信号を電波伝搬の分析に応用した。その成果の一例は、地上受信局の位置決定に役立つ実用的な知見であり、社会インフラ整備に貢献する点で、社会的意義を持っている。また、新しい低コストな測定手法を提案したという成果は、研究開発のすそ野の拡大に寄与するという点で、学術的に意義がある。

研究成果の概要(英文)：ADS-B is a system for aircraft to report its own position and other information via wireless signals. This research attempts to measure ADS-B signals and analyze them from a viewpoint of air-ground radio-signal propagation. Result of the analysis is useful for designing ground receiver locations. In this research, the effectiveness of the proposed approach was firstly evaluated and a technique for mitigating the measurement error was developed because the ADS-B approach is novel. Then, a measurement and analysis of target-of-opportunity were conducted. As a result, a statistical model of received power distribution was obtained. Also, a comparison between an electromagnetic simulation and measurement was made in a mountainous region. As a result, an evaluation result of the simulation method and insights on the effect of the mountainous terrain were obtained.

研究分野：電波伝搬

キーワード：航空監視 電波伝搬

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

管制官に航空機位置を提供する航空機監視システムとしては二次監視レーダが従来用いられてきた。航空交通需要の拡大に伴い、より高性能な WAM(Wide Area Multilateration)や ADS-B(Automatic Dependent Surveillance - Broadcast)の導入が世界的に始まっている。WAM/ADS-Bの性能を十分に引き出すには覆域設計を適切に行う必要があり、ひいては空地電波伝搬モデルの選択が極めて重要である。加えて、近年は無人機といった新しいユーザに対する通信需要も生まれている。したがって、空地電波伝搬研究の重要性が増している。

空地電波伝搬における重要な研究手法は航空機を用いた飛行実験である。しかしながら、航空機を用いるため高コストかつ実験条件が限定される課題があった。一方で、近年は ADS-B 対応航空機が増加してきている。したがって、在空機の放送する ADS-B 信号を伝搬測定に活用できれば従来の飛行実験を補完する魅力的なデータが取得可能と考えられる。さらに、低コスト化により本分野における研究活動のすそ野を広げることができる。加えて、覆域設計の観点からは、モデルの検証や新しいモデルの導出など、実用面での価値ある参考情報を提供できる。

2. 研究の目的

本研究では、近年搭載が進んでいる ADS-B による航空機監視情報放送を空地伝搬測定に活用することを提案する。学術的観点からは提案手法を新しい空地伝搬測定手法として確立すること、および空地伝搬メカニズムに関する新たな知見を得ることが目的である。実用的観点からは覆域設計に関する知見を得ることが目的である。

3. 研究の方法

本目的を達成するために実施した項目は、(1) 提案手法の有効性評価、(2) 機体運動やマルチパスなどによる受信電力変動の統計的モデル化、(3) 各種伝搬モデルの評価と空地伝搬メカニズムの検討である。図 1 には研究目的と実施項目の対応関係を示す。

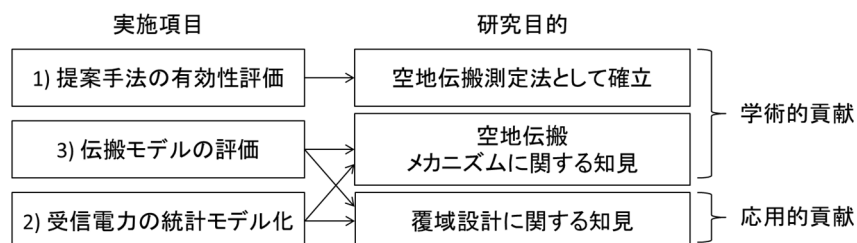


図 1. 研究実施項目と研究目的の対応関係。

(1) 提案手法の有効性評価

計画当初、本研究は研究代表者らが整備している航空信号観測システムのデータ解析を中心に進める予定であった。しかしながら、研究成果を普及するという観点からは、近年研究ツールとして幅広く利用されているソフトウェア無線機を利用することが適切だと判断し、方針を変更した。提案手法の有効性評価としては、ADS-B 信号を使う場合の課題を抽出し、これを基に測定可能な伝搬特性項目を検討した。さらに、誤差要因の整理と誤差対策技術の開発を実施した。

(2) 受信電力の統計的モデル化

受信電力の統計的モデル化を行うために、電子航法研究所(調布市)に設置されたセクタ型アンテナを用いて東京国際空港への着陸便に対する測定を行った。そして、データの事前処理を加え、データセットを準備した。このうちモデル化には、測定時間計 31 時間、機体数 495 機、信号数 111896 個を用いた。図 2 には代表的な機体の航跡を示す。図中で色付けされた場所がモデ

ル化に使用したエリアである(セクタアンテナのメインビームに相当)。モデル化には最尤推定による分布関数のパラメータ推定, コルモゴロフ・スミルノフ検定, 赤池情報基準によるモデル選択を応用した。

(3) 電波伝搬モデルの評価

現在, 実用レベルで最も高度な空地伝搬予測モデルの 1 つに物理光学近似に基づく Air-Predict(CRC-Predict)モデルがある。また, それに組み合わせる地形データとして Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)がある。Air-Predict および SRTM による受信電力の予測について, 在空機測定結果との比較を行った。対象の場所としてブータン王国におけるパロ空港近辺を選択した。ここは空港周辺が標高 5000 m を越える山岳地帯となっており, 地形の影響が顕著に表れることが期待される。また, ADS-B の覆域設計の観点からも, 極めて技術的困難を伴う地点である。図 3 には測定環境の写真および測定された航空機の航跡例を示す。

4. 研究成果

(1) 研究の主な成果

提案手法の有効性評価

まず, 電波伝搬研究に ADS-B 信号を用いる

際の課題を整理した。その結果, 正確な送信信号や送信電力が厳密には不明である点, 測定にはデコードの成功が必要である点, 同一帯域内の信号干渉を受ける点, 送信スキーム(送信レートと機上アンテナの選択)が影響する点が明らかとなった。これを踏まえ, 代表的な伝搬特性が測定可能かどうかを検討し, 伝搬損失・シャドウイング・フェージングの影響を受けた結果である受信電力(受信信号強度)が測定可能であると結論づけた。ただし, 信号干渉により受信電力測定精度が劣化する可能性があるほか, 各機体の送信電力や送信アンテナ利得の個体差が課題だと判明し, 対策法を提案した。

信号干渉の対策として, 受信電力の計算において信号干渉の影響を受けたサンプルを取り除く手法を開発した。図 4 にはその結果例を示す。

北風運用

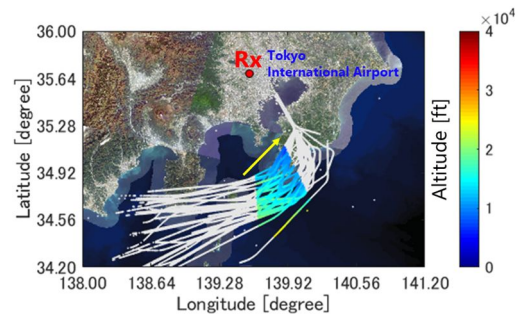


図 2. 代表的なモデル化対象機体の航跡 [1].

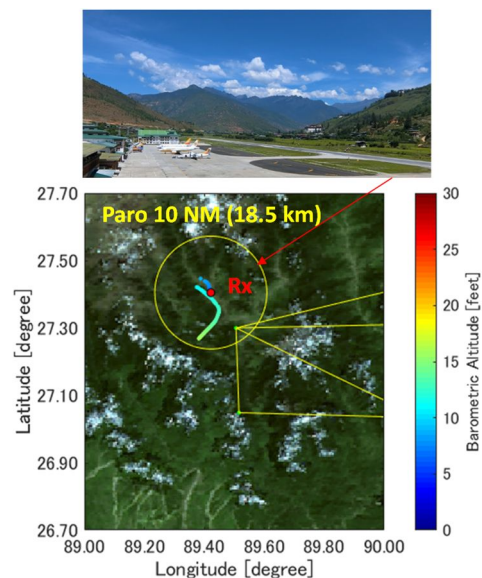


図 3. パロ空港における測定:(上) 空港 (下) 測定された航跡の例 [3].

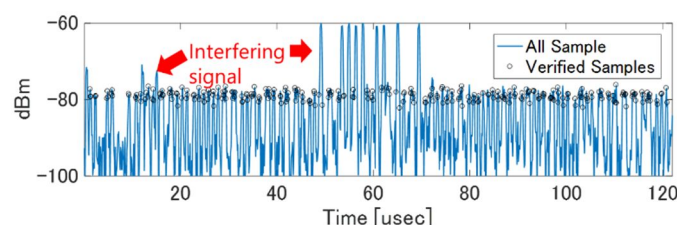


図 4 信号干渉が重畳した ADS-B 信号と干渉の除去 [2].

図4では、ADS-B信号に干渉信号が重畳している(赤色の矢印)。提案手法は重畳信号がはずれ値として検出できる性質を応用し、重畳した信号を取り除く。残ったサンプル(図中黒丸)を用いて重み付け平均を用いて受信電力を計算する。これを全ての信号に対して繰り返し、受信電力の測定精度を改善できた。

送信電力や送信アンテナ利得の個体差への対策として、個体差を包含することのできる受信電力分布モデルの提案を行った。すなわち、逆転の発想である。これに関しては次ので詳しく説明する。以上により、有効性評価を達成し、ADS-B信号が電波伝搬研究に活用可能であることを示した。

受信電力の統計的モデル化

まず1機の作る受信電力分布を $P_r = \hat{P}_r + B + X$ として記述するモデルを得た。ここで P_r は受信電力、 \hat{P}_r は各種パラメータに公称値を用いた自由空間モデルによる受信電力、 B は EIRP バイアスと呼び本研究で新しく導入した項、 X はフェージングの項である。 B の EIRP バイアスは航空機ごとに決まる定数値であり、送信された電力(アンテナ利得を含む)について公称値と実際の差、すなわち個体差を表している。フェージング X は確率変数であり、仲上ライス分布および正規分布をあてはめた。モデル選択の結果、正規分布がより良いことが分かった。したがって、正規分布の標準偏差を Γ と書けば、 $X \sim N(0, \Gamma^2)$ となる。

次に複数機の作る受信電力分布についてモデルを得た。機体ごとに B の値および X のパラメータ Γ が異なることを踏まえ、これらの和の項 $\Delta = B + X$ に関するモデル化を行った。モデル化には、確率分布のパラメータもまた確率分布に従うという複合分布を利用した。この場合、 Δ の分布関数は B と Γ に関する積分で、次式のように記述される。

$$P(\Delta) = \iint p(B)p(\Gamma)P(\Delta|B, \Gamma)dBd\Gamma$$

ここで $P(\Delta|B, \Gamma)$ は前述した1機の作る受信電力分布のモデル(累積分布関数)である。

$p(B)$ および $p(\Gamma)$ はそれぞれ B および Γ の確率密度関数を示している。測定データから統計モデル化を行い、 B は正規分布、 Γ は対数正規分布で良好にモデル化された。なお分布関数は、正規分布・対数分布・ガンマ分布・ワイブル分布・対数正規分布から選択した。このようにして得られたモデルは測定データの分布と良好に一致した。

しかしながら、本モデルは数値積分を伴うため、さらなる単純化として正規分布による近似、 $\Delta \sim N(\mu_\Delta, \sigma_\Delta^2)$ を導入した。そして、そのパラメータは複合分布の性質を利用して、次式のように計算できることを明らかにした。

$$\mu_\Delta = \mu_B, \quad \sigma_\Delta^2 = \sigma_\Gamma^2 + \mu_\Gamma^2 + \sigma_B^2$$

μ_B, σ_B^2 は $p(B)$ の平均および分散、すなわち送信電力・利得に関する個体差に関連している。
 $\mu_\Gamma, \sigma_\Gamma^2$ は $p(\Gamma)$ の平均および分散、すなわちフェージングパラメータの個体差に関連している。
 図5には提案モデル(青線)と測定データ(赤線)の比較を累積分布関数として示しており、良好な一致を確認できた。これにより、受信電力分布のモデル化を達成した。本成果は覆域設計に活用できる実用的な成果であるほか、受信電力分布の形成メカニズムを明瞭に記述できる意味で、空地電波に関する学術的な貢献である。

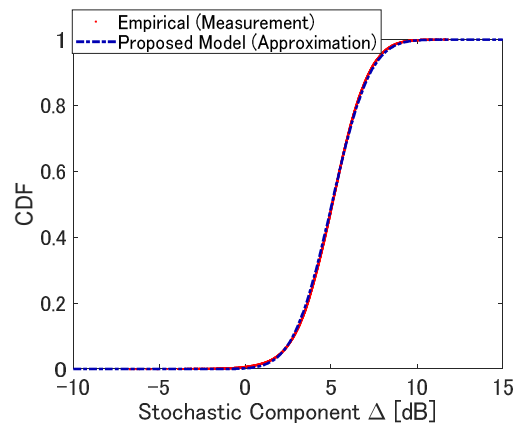


図5 提案モデル(青線)と測定(赤線)の累積分布に関する比較 [1]。

既存の電波伝搬モデルの評価

既存のモデルから物理光学近似に基づく CRC-Predict モデルを選択し、測定データと比較した。図 6 には代表的な結果として、山岳遮蔽による信号消失に関する結果を示す。図中の色は信号受信に必要な航空機高度を示す。白丸は測定結果を示し、黒の破線は測定で信号が観測できなかった箇所を示している。実際の飛行高度が予測で必要とされた高度よりも低い場合に、信号が消失していることが確認できた。つまり、予測と測定が一致した。以上から、予測モデルが覆域設計に十分活用できるとの実用的な知見を得た。

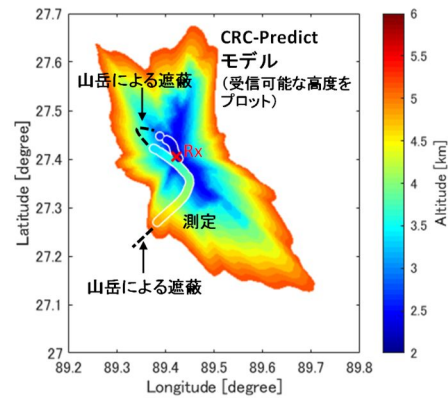


図 6. 山岳遮蔽による信号消失について、既存モデルの予測と測定データの比較 [3] .

また、上記の結果の他、航空機が遠方で十分に見通しがとれる場合にも受信電力の傾向が良好に一致した。盆地においては地形に沿った反射波の伝搬による信号受信も期待されたが、遮蔽がある場合には信号を受信することができなかった。建物を除けば信号受信の可否はほぼ地形による遮蔽で決まることが示唆された。本成果は覆域設計に活用できる実用的な成果であるほか、空地電波メカニズムに関する知見となる学術的な貢献である。

(2) 得られた成果の国内外における位置づけとインパクト

航空分野において、在空機 ADS-B 信号により航空に関するデータセットが安価に構築できることは広く知られており、国内外で様々な応用が試みられてきた。本研究はその流れにおいて初めての本格的な電波伝搬研究であり、ADS-B 応用の開拓に貢献した。他方、電波伝搬分野に向けては、高コストな飛行実験に頼っていた空地電波伝搬を補完できる安価な測定方法を提案した。低コスト化により、より多くの研究者が空地電波伝搬研究へ参加することが期待されるため、本研究の成果は電波伝搬研究のすそ野の拡大に貢献した。さらに、測定データに基づいて導出した統計モデルや CRC-Predict モデルの検証結果といった成果は、ADS-B や WAM の覆域設計に活用できるため実用的な意義がある。

(3) 今後の展望

今後の展望として、提案手法をコスト面からより魅力的なものとするため、市販のホビー用 ADS-B 受信機の利用可能性を検討する価値がある。実際、そのような受信機を利用したユーザ参加型センサネットワークが既に世界的に構築されている。これを活用できれば、国内外の多様な地点における分析が可能になるほか、より多くの研究者が電波伝搬分野に参加可能となる。また、提案した受信電力分布のモデル化手法を活用し、ターミナルや航空路といったシナリオごとのパラメータセットを提供すれば、実システムの覆域設計に資することができる。

< 引用文献 >

- [1] J. Naganawa, et al, "Opportunistic-Target-Measurement-Based Narrowband Statistical Modeling of Civil Aviation Surveillance Signal at 1090 MHz," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 68, No. 3, Mar 2020.
- [2] J. Naganawa, et al, "A Method for Accurate ADS-B Signal Strength Measurement under Co-channel Interference," *2018 APMC*, pp.354-356, Kyoto, Japan, Nov. 2018.
- [3] J. Naganawa, et al, "Measurements of Opportunistic Aircraft Signals and Verification of a Propagation Prediction Tool in Mountainous Region," *EuCAP 2020*, Copenhagen, Denmark.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 NAGANAWA Junichi, MIYAZAKI Hiromi	4. 巻 68
2. 論文標題 Opportunistic-Target-Measurement-Based Narrowband Statistical Modeling of Civil Aviation Surveillance Signal at 1090 MHz	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Antennas and Propagation	6. 最初と最後の頁 2304 ~ 2314
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TAP.2019.2949365	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件/うち国際学会 5件）

1. 発表者名 NAGANAWA Junichi, Karma Wangchuk, Sangay, Karma Gayley, Devi Adhikari, MIYAZAKI Hiromi
2. 発表標題 Measurements of Opportunistic Aircraft Signals and Verification of a Propagation Prediction Tool in Mountainous Region
3. 学会等名 European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP) 2020（国際学会）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Karma Wangchuk, Sangay, NAGANAWA Junichi
2. 発表標題 ADS-B Coverage Design in Mountainous Terrain
3. 学会等名 ENRI International Workshop on ATM/CNS (EIWAC 2019)（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 長縄, 宮崎
2. 発表標題 在空中機測定に基づく1090MHz帯民間航空監視信号の狭帯域モデル化
3. 学会等名 電子情報通信学会 アンテナ・伝播研究会
4. 発表年 2019年

1 . 発表者名 J. Naganawa and H. Miyazaki
2 . 発表標題 A Method for Accurate ADS-B Signal Strength Measurement under Co-channel Interference
3 . 学会等名 2018 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC) (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 J. Naganawa and H. Miyazaki
2 . 発表標題 Comparison between Opportunistic Measurement and Nominal Link Budget for Aeronautical Surveillance Signal
3 . 学会等名 European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP) 2019 (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 J. Naganawa, H. Miyazaki, T. Otsuyama, and J. Honda
2 . 発表標題 Initial Results on Narrowband Air-Ground Propagation Channel Modeling using Opportunistic ADS-B Measurement for Coverage Design
3 . 学会等名 2018 Integrated Communication, Navigation, and Surveillance Conference (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 J. Naganawa
2 . 発表標題 ADS-B Signal Propagation Measurement and Application to WAM Constellation Design
3 . 学会等名 5th ENRI International Workshop on ATM/CNS
4 . 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----