

2.1. 5GHz 帯のMIMOアンテナ配置と通信路容量

監視通信領域 ※金田直樹, 住谷泰人, 米本成人, 河村暁子, ニッ森俊一, 磯崎栄寿（現：(財) 航空保安無線システム協会）

1. はじめに

現在の航空交通管制は主に VHF 帯のアナログ音声によって行われている。航空交通管制に利用可能な航空用デジタル通信システムの典型的な通信速度は 31.5 kbps である [1]。このような低速な通信システムでは将来の航空交通量の増大に対応できないと言われている。このため、高速な航空用高速デジタル通信システムが必要とされている [2]。このようなシステムの候補として、Aeronautical Mobile Airport Communication System (AeroMACS) が、国際民間航空機関にて 5GHz 帯での航空用高速デジタル通信システムとして標準化作業中である [3]。AeroMACS は IEEE 802.16e で規定されるモバイル WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) を用いる。AeroMACS はこれまでの SISO (Single-Input Single-Output) システムに代わり、複数のアンテナを用いる MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) システムにより通信の高速化を図っている。MIMO システムではアンテナ間の電波伝搬特性が通信速度に直接的に影響するため、アンテナの位置関係、航空機の構造体、建物による反射や遮蔽などに起因する電波伝搬特性の変化と通信速度の関連を明らかにする必要がある。

本稿では、実験用航空機を用いて実環境下で MIMO システムを導入した場合の評価結果を報告する。航空機へのアンテナ装備は高価であるが、地上施設へのアンテナ装備は比較的安価である。そのため、地上施設におけるアンテナの本数を増やした非対称 MIMO システムについても実験的検討と解析を行う。特に、標準的な 2x2 MIMO システムと非対称 2x6 MIMO システムを用いた場合に、SISO システムでは通信路容量が悪化するような条件下におけるチャネル容量増加の効果について検討を行う。

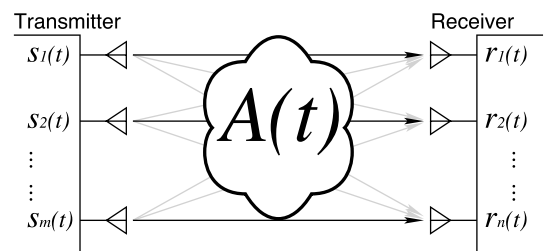


図 1: MIMO システムによる情報伝送の概念

2. MIMO システム

2.1 MIMO システムの数学的表現

MIMO システムとは複数の送信アンテナと複数の受信アンテナを同時に用いる通信システムである。送信機が m 個の出力を持ち、受信機が n 個の入力を持つシステムについて考える。図 1 にこのような MIMO システムによる情報伝送の概念図を示す。このシステムにおいて送信機からの出力信号を各々 $s_1(t), s_2(t), \dots, s_m(t)$ 、受信機への入力信号を各々 $r_1(t), r_2(t), \dots, r_n(t)$ とする。このとき、 r は送信機からの信号 s に伝送路特性を表す行列 $A(t)$ を乗じた値と各受信機への雑音 $n_1(t), n_2(t), \dots, n_m(t)$ の和により与えられる。

$$(r_1(t), \dots, r_n(t))^T = A(t)(s_1(t), \dots, s_m(t))^T + (n_1(t), \dots, n_m(t))^T$$

ここで、行列 $A(t)$ は以下のように定義される。

$$A(t) = \begin{pmatrix} a_{11}(t) & a_{12}(t) & \cdots & a_{1m}(t) \\ a_{21}(t) & a_{22}(t) & \cdots & a_{2m}(t) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1}(t) & a_{n2}(t) & \cdots & a_{nm}(t) \end{pmatrix}$$

ここで a^T は a の転置行列を表す。行列 $A(t)$ の要素 $a_{ij}(t)$ は j 番目の送信アンテナと i 番目の受

信アンテナの間の伝送路特性を表す。

行列 A をチャネル応答行列と呼ぶ。チャネル応答行列は送信アンテナおよび受信アンテナの特性を含む電波伝搬路の特性を表し、アンテナの位置関係等の空間特性、各アンテナ間の伝搬特性などに依存する。このとき、行列 A の固有値 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{\min(m,n)}$ が等価的に $\min(m, n)$ 本の伝送路の伝搬損失を与える。チャネル応答行列の固有値の導出の詳細については付録に記す。

ここまでは時間領域で記述してきたが、フーリエ変換により物理的に同じ現象を周波数領域で表現することもできる。 $A(t), s(t), r(t), n(t)$ をフーリエ変換して得られる周波数領域での表現を $\hat{A}(f), \hat{s}(f), \hat{r}(f), \hat{n}(f)$ と記述することになると、 $\hat{A}(f), \hat{s}(f), \hat{r}(f), \hat{n}(f)$ の関係は以下ようになる。

$$\begin{aligned} (\hat{r}_1(f), \dots, \hat{r}_n(f))^T &= \hat{A}(f)(\hat{s}_1(f), \dots, \hat{s}_m(f))^T \\ &+ (\hat{n}_1(f), \dots, \hat{n}_m(f))^T \end{aligned}$$

ここで、行列 $\hat{A}(f)$ は $A(t)$ と同様に定義される。

$$\hat{A}(f) = \begin{pmatrix} \hat{a}_{11}(f) & \hat{a}_{12}(f) & \cdots & \hat{a}_{1m}(f) \\ \hat{a}_{21}(f) & \hat{a}_{22}(f) & \cdots & \hat{a}_{2m}(f) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \hat{a}_{n1}(f) & \hat{a}_{n2}(f) & \cdots & \hat{a}_{nm}(f) \end{pmatrix}$$

行列 \hat{A} の固有値 $\hat{\lambda}_1(f), \hat{\lambda}_2(f), \dots, \hat{\lambda}_{\min(n,m)}(f)$ を求めることにより、時間領域での議論と同様、等価的な伝搬損失を求めることができる。

WiMAX, LTE, および無線 LAN 等の MIMO アンテナシステムを利用した実際に利用される広帯域システムでは OFDM を用いており、帯域内の周波数特性が不均一となること、すなわち周波数選択性フェージングが課題になることから、以下の議論においては周波数表現による MIMO システムの記述を用いる。

2.2 MIMO システムのチャネル容量

SISO アンテナシステムの場合、周波数あたりの理論的通信路容量 C_{SISO} (bit/sec/Hz) は以下の式で与えられる。

$$C_{\text{SISO}}(f) = \log_2 \left(1 + \frac{L(f)P(f)}{N(f)} \right)$$

ここで、 $P(f)$ は送信機の出力電力、 $N(f)$ は受信機に入る雑音電力、 $L(f)$ は送信機から受信機までの損失である。

同様に $m \times n$ MIMO システムのチャネル容量 $C_{m \times n \text{MIMO}}$ は以下の式で与えられる。

$$C_{m \times n \text{MIMO}}(f) = \sum_{i=1}^{\min(m,n)} \log_2 \left(1 + \frac{\lambda_i(f)P(f)}{mN(f)} \right)$$

ここで、 P は送信機の総出力電力、 N は各受信機への雑音電力、 λ_i は先に求めたチャネル応答行列の固有値、 m は送信アンテナの本数である。なお、航空機は高速移動体であるため本論ではチャネル応答推定は行わないものと仮定して計算する。

2.3 MIMO システムの評価指標

アンテナの数を増やした非対称 MIMO システムの効果を定量的に評価するために、従来の手法である SISO や、対称 MIMO システムと比較するための指標を導入する必要がある。本稿では MIMO の評価指標には MIMO と SISO を比べた場合の高速化の効果を評価するため、チャネル容量比を用いることとする。チャネル容量比 k_{mm} を以下のように定義する。

$$k_{mm} = \frac{C_{m \times n \text{MIMO}}}{C_{\text{SISO}}}$$

ここで、 C_{SISO} は SISO システムの通信路容量、 $C_{m \times n \text{MIMO}}$ は送信アンテナ m 本、受信アンテナ n 本の MIMO システムのチャネル容量を表す。

3. 実験

チャネル容量改善効果の距離および角度依存性について調べるため、以下に述べる測定環境およびシステムによって測定を行う。

3.1 測定環境

仙台空港において、当所の実験用航空機の航空機局アンテナと、測定車上に設置した地上局アンテナ間の電波伝搬特性を測定する。測定の様子を図2に示す。A1, A2 はそれぞれ航空機局ア

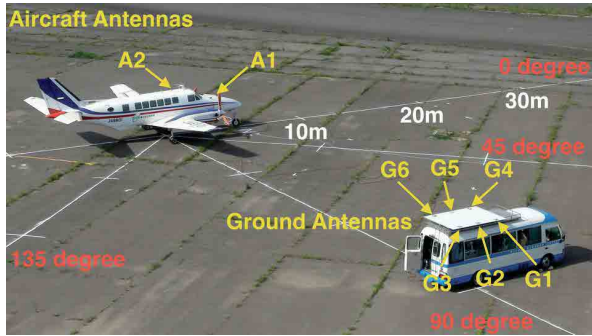


図 2: 航空機と測定車による測定

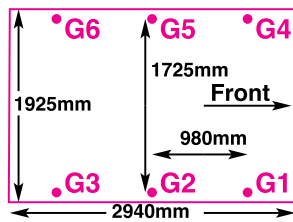
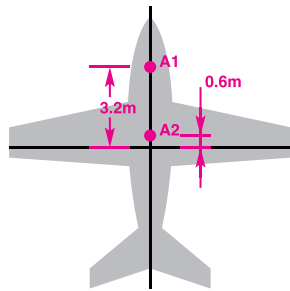


図 3: 航空機局および地上局のアンテナ配置

ンテナの位置, G1, G2, G3, G4, G5, G6 はそれぞれ測定車屋上グランドプレーン上に設置した地上局アンテナの位置である。図3に詳細な航空機局および地上局のアンテナ配置を示す。翼端灯を結ぶ線と航空機胴体中心線の交点を測定系全体の原点とする。コクピット前に位置する MLS 用 $1/4 \lambda$ アンテナが A1, 胴体上に位置する同じく $1/4 \lambda$ アンテナが A2 である。A1 は原点より 3.2m 前方胴体中心線上に位置し, A2 は原点より 0.6m 前方胴体中心線上に位置する。

航空機局と地上局の位置関係を図4に示す。航空機局と地上局の間の距離は 10, 20, 30, 40m である。この距離はアンテナ G2 と測定系全体の原点までの距離と定義する。航空機の機首方向

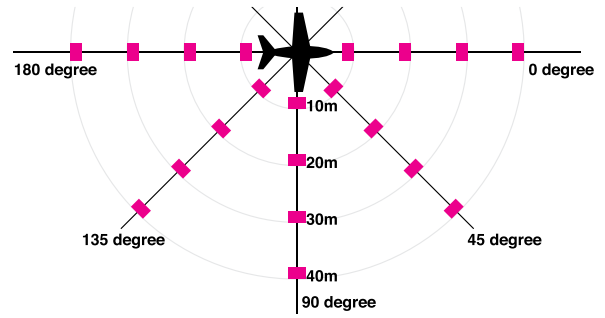


図 4: 航空機局と地上局の位置関係

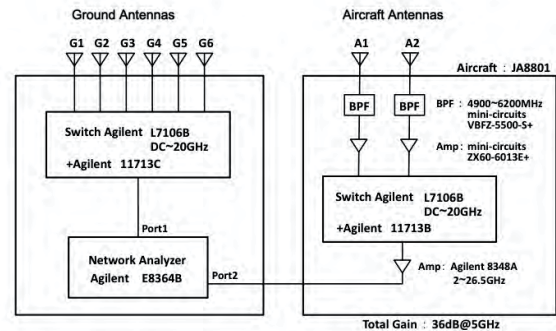


図 5: 測定システム全体の構成図

から見て角度は時計回りに 0, 45, 90, 135, 180 度とする。航空機局同様, 地上局アンテナはすべて $1/4 \lambda$ 無指向性アンテナである。

3.2 測定システム

測定システム全体の構成図を図5に示す。6本の地上局アンテナと2本の航空機局アンテナ間において, Sパラメータ S_{21} をベクトルネットワークアナライザ (VNA) Agilent E8364B にて測定する。VNA のポート 1 はグランドプレーン上の地上局アンテナ 6本と, ポート 2 は航空機局のアンテナ 2本と, それぞれ高周波スイッチを介して接続されている。SN比改善のため, 航空機局アンテナと高周波スイッチの間にはバンドパスフィルタ (BPF) と増幅器 (Amp) を挿入する。高周波スイッチと VNA の間のケーブル損失を補償するため増幅器を高周波スイッチ直後に挿入する。このシステムでは信号を地上局アンテナから送信し航空機局アンテナで受信しているが, 相反定

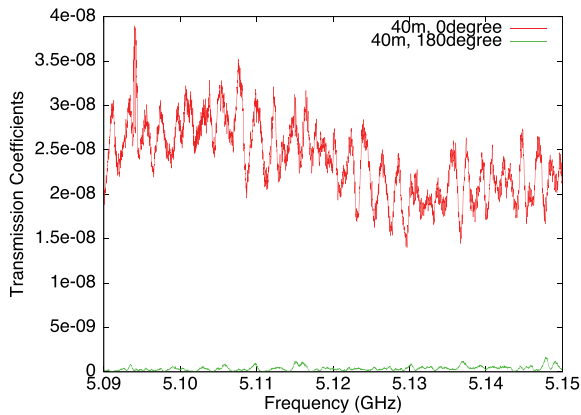


図 6: A2 と G2 間の S_{21} の周波数特性

理から送受信を逆にしてもチャンネル容量は変化しない。

AeroMACS は 5091 MHz から 5150 MHz の利用を想定している [3]。そこで、測定帯域は 5080 MHz から 5120 MHz, 5120 MHz から 5160 MHz までとする。測定点数は、それぞれの帯域で 4001 点とする。これはモバイル WiMAX が 5MHz ステップの場合サブキャリア 512 本, 10MHz ステップの場合サブキャリア 1024 本であることを反映させている。VNA の IF 帯域幅は SN 比向上のため 1kHz とした。配線と増幅器の影響はキャリブレーションおよび後処理により除去する。

4. 結果及び解析

アンテナ A2 から G2 までの S パラメータ S_{21} の周波数特性の一例を図6に示す。横軸は周波数、縦軸は S_{21} の絶対値である。緑の線は原点からの距離 40m, 角度 180 度における測定値であり、赤の線は距離 40m, 角度 0 度における測定値である。

航空機の前方である角度 0 度に比べ後方である角度 180 度における測定値が低いことがわかる。これは A2 から見たとき角度 180 度となる方向にのみ垂直尾翼があり、見通しを遮られているからであると考えられる。

測定された S_{21} から構成されるチャンネル応答行列により相関行列の固有値を計算した。一例として (A1, A2, G2, G5) のアンテナの組から成る 2x2 MIMO システムの固有値を図7に示す。

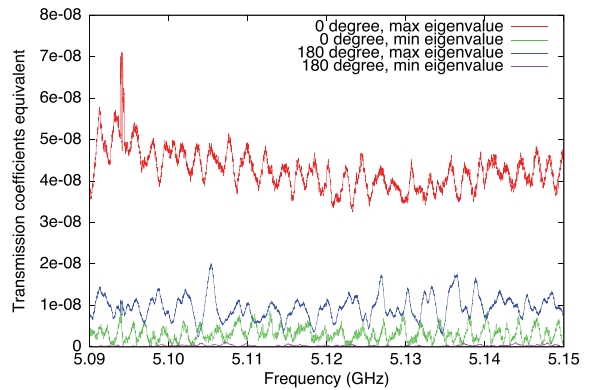


図 7: 2x2 MIMO の場合の固有値

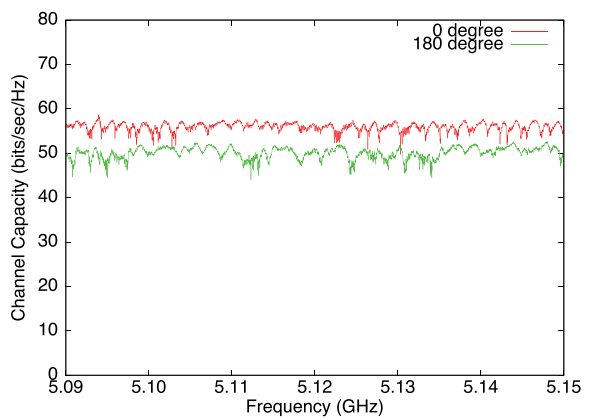


図 8: 2x2 MIMO システムのチャンネル容量 ($0^\circ, 180^\circ$)

横軸は周波数、縦軸は固有値を示す。航空機の前方である距離 40m, 角度 0 度における固有値に比べ、航空機の後方である距離 40m, 角度 180 度における固有値が低いことがわかる。

図7に示す相関行列の固有値から計算したチャンネル容量を図8に示す。横軸は周波数、縦軸はチャンネル容量を示す。航空機の前方である距離 40m, 角度 0 度におけるチャンネル容量に比べ、航空機の後方である距離 40m, 角度 180 度におけるチャンネル容量がほぼすべての周波数において低くなっていることがわかる。

また、非対称 MIMO システムについて検討を行うため、2x6 MIMO システムの場合についてもチャンネル容量を求めた。

SISO および MIMO システムに対する航空機のまわりの角度および距離依存性を評価する。SISO システムの通信路容量はアンテナ A2 と G2

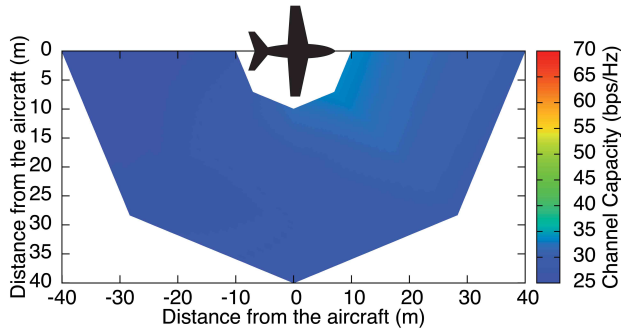


図 9: SISO システムの通信路容量の等高線図

の間の通信路容量を用いた。図9は航空機の右側における SISO システムのチャンネル容量を示す。チャンネル容量の単位は bit/sec/Hz である。チャンネル容量は色で示している。青が 25 bit/sec/Hz, 赤が 70 bit/sec/Hz を示す。航空機は上端中央に位置する。前方におけるチャンネル容量はおおよそ 30 bit/sec/Hz, 後方におけるチャンネル容量はおおよそ 26 bit/sec/Hz である。航空機後部はアンテナ A2 から見たときに後方の垂直尾翼により見通しを遮られるために前方より後方のチャンネル容量が低下しているためと考えられる。

図10 に航空機の右側における 2x2 MIMO および 2x6 MIMO システムのチャンネル容量を示す。本章において 2x2 MIMO システムとしてアンテナの組 (A1, A2, G2, G5) を選んで評価した。チャンネル容量は図 10 同様に色で示しており、チャンネル容量の単位は bit/sec/Hz である。航空機は上端中央に位置する。2x2 MIMO, 2x6 MIMO システムともにチャンネル容量はおおむね SISO システムの場合の倍であり、2x2 MIMO システムより 2x6 MIMO システムの方がチャンネル容量が大きいことがわかる。しかし SISO システムの場合と同様に後方のチャンネル容量が低下している。

チャンネル容量の増加傾向を明らかにするためチャンネル容量比 k_{mn} を評価する。図 11 に 2x2 MIMO システムの場合の k_{22} および 2x6 MIMO システムの場合の k_{26} を示す。青が 1.8, 赤が 2.2 を示す。どちらも航空機前方と比べ航空機後方における改善率が高いことがわかる。また、2x2 MIMO システムの場合より 2x6 MIMO システムの場合の方が改善率が高いことがわかる。2x2 MIMO システムの距離 10m, 角度 180 度における k は

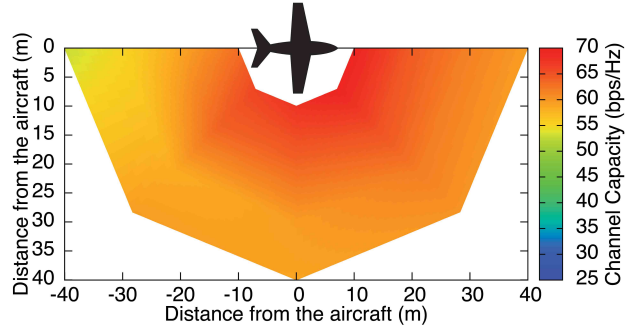
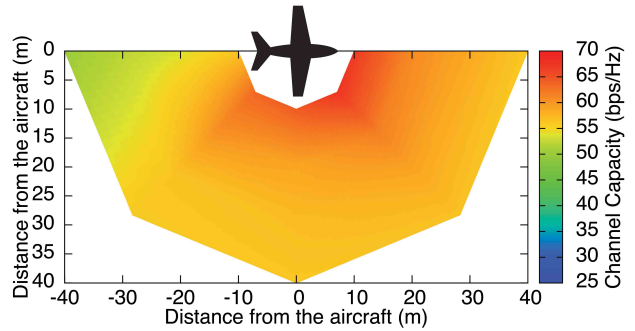


図 10: MIMO システムのチャンネル容量の等高線図 (上:2x2 MIMO, 下:2x6 MIMO)

低い, これはアンテナ A1, A2 の双方ともがアンテナ G2, G5 への見通しを垂直尾翼により遮られるからであると考えられる。一方, 2x6 MIMO システムの場合はアンテナ A2 からアンテナ G4 や G6 への見通しが確保されるため, そのような問題が発生することはない, すべての場所において k が安定して増加していると考えられる。これらの結果から, MIMO システムにおいて受信アンテナを増やすことは実際の航空機と空港環境において安定した高速大容量通信を提供することができると言える。

5. まとめ

本稿では, 実環境下にて実施した実験用航空機を用いた MIMO システムの性能評価結果について報告した。この評価では, 一方のアンテナの数を増やした非対称 MIMO システムの効果を定量的に表すため, SISO システムと比較した場合の指標を定義した上で, 角度および距離依存性を求めた。この結果, SISO 及び MIMO システムにおけるチャンネル容量は, アンテナ間距離に必ずしも依存しないことがわかった。航空機後方の地上局アンテナの場合, SISO システムの

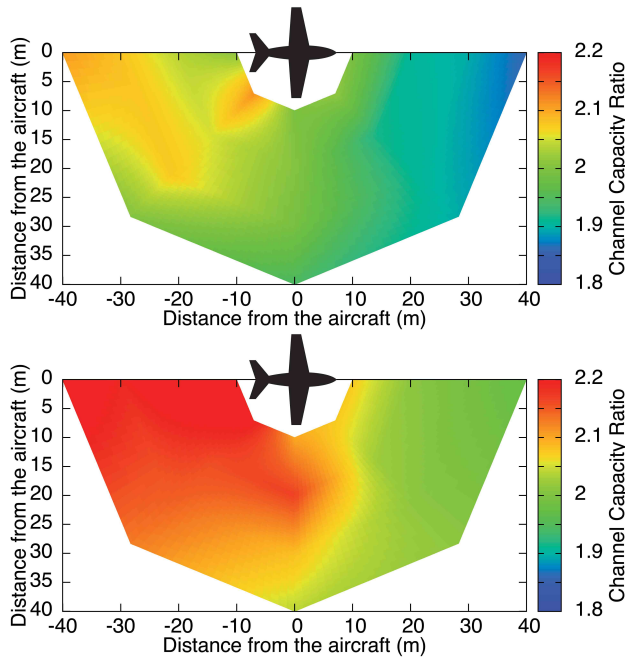


図 11: チャネル容量比 k の等高線図
(上: 2x2 MIMO, 下: 2x6 MIMO)

チャネル容量が低かったが、2x2 MIMO システム及び非対称の 2x6 MIMO システムのどちらの MIMO システムもチャネル容量の低減は、SISO システムと比べ改善されていることが、指標により明らかになった。また、MIMO システムどうしの比較では、2x2 MIMO システムよりも、受信アンテナ数を増加させた 2x6 MIMO システムの方がその改善率が高い結果が得られた。このため、AeroMACS に代表される MIMO システムを航空分野で利用する場合においては、容易にアンテナ数を増加可能な地上において受信アンテナ数を増加させることで、通信性能が向上する可能性があるといえる。今後は、AeroMACS の開発にあたって、このような実環境における実験により最適なアンテナ配置を決定していく予定である。

謝辞

実験にご協力いただきました国土交通省東京航空局仙台空港事務所関係各位に深く感謝いたします。

参考文献

- [1] D. Stacey, “Aeronautical Radio Communication Systems and Networks,” John Wiley & Sons, Ltd., Apr. 2008.
- [2] B. Philips and J. Pouzet, “COMMUNICATIONS OPERATING CONCEPT AND REQUIREMENTS,” *ICAO ACP/I, IP 5*, <http://www.icao.int/anb/panels/acp/wgdoclist.cfm?MeetingID=188>
- [3] ICAO, “ACP WG-S/1 Meeting Report,” *ICAO ACP WG-S/1 RPT1*, 2012
<http://legacy.icao.int/anb/panels/acp/wgdoclist.cfm?MeetingID=289>
- [4] 唐沢好男, 「MIMO 伝搬チャネルモデリング」, 信学論 B Vol. J86-B No.9 pp. 1706–1720, 2003
- [5] 齋藤正彦 「線形代数入門」 東大出版会, 1966

付録: チャネル応答行列の固有値

$n \times m$ チャネル応答行列 A に対し、 $H_s = A^*A$, および $H_r = AA^*$ を相関行列と呼ぶ。ここで、 A^* は A の転置共役行列を表す。相関行列が半正定値エルミート行列であることから、相関行列の固有値はすべて非負の実数であり、 H_s, H_r に対して $U_s^{-1}H_sU_s$, および $U_r^{-1}H_rU_r$ が対角行列となるようなユニタリ行列 U_s, U_r が存在する。 H_s, H_r の固有値および独立な固有ベクトルは $\min(n, m)$ 個存在し、 H_s, H_r の固有値はすべて同じである。相関行列の固有値を大きい順に $h_1, h_2, \dots, h_{\min(n, m)}$ とする。このとき、 $n \times m$ 行列 A は m 次元ユニタリ行列 V と n 次元ユニタリ行列 W により $A = V\Sigma W$ の形に分解することができる。ここで Σ は対角成分が $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{\min(n, m)}, 0, \dots$ であり、非対角成分が 0 であるような行列である。このとき、 A の固有値 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{\min(n, m)}$ はそれぞれ $\sqrt{h_1}, \sqrt{h_2}, \dots, \sqrt{h_{\min(n, m)}}$ と等しい。この手順は特異値分解として知られている [5]。