

論文95-32A-9-1

Multi-level & Multi-bandwidth 시스템에서 위성중계기 입력반송파 전력의 최적 할당 기법

(A Method for Optimal Power Assignment of the Transponder Input Carriers in the Multi-level & Multi-bandwidth System)

金炳均*, 崔炯辰*

(Byung Kyun Kim and Hyung Jin Choi)

요약

본 논문에서는 다중 레벨 및 다중 대역폭(Multi-level & Multi-bandwidth) 시스템에서 적용할 수 있는 위성중계기 입력반송파 전력의 최적 할당 방안을 제시 한다. 최적 전력 할당을 위해 분석한 잡음 및 간섭효과는 위성 중계기의 비선형성에 의해 발생하는 혼변조적, 상·하향 위성링크에서 발생하는 인접채널간섭, 공동채널간섭, 열잡음 및 강우 효과 등이다. 최적의 중계기 입력반송파 전력을 결정하기 위하여 수학적 해석이 요구되는 Fletcher-Powell 최적화 알고리즘을 적용하였다. 최적할당을 위한 성능기준으로는 다양한 위성통신 링크 환경에 대처하기 위하여 수신 지구국에서의 CNR(Carrier-to-Noise Ratio)을 기준으로 4 가지로 분류하여 적용하였다. 또한 알고리즘 적용을 위해서 각각의 성능기준에 따른 목적함수의 구성 및 편미분 해석을 수행하였다. 위성통신링크의 성능은 위성링크 및 위성체에서 발생하는 다양한 간섭 및 잡음효과에 복합적으로 영향을 받으므로 이러한 효과의 수학적 모델 및 분석, 그리고 이를 고려한 위성중계기 입력반송파 전력의 최적 할당 방안의 제시는 위성시스템 설계의 이론과 실제에서 매우 중요한 의미를 가진다고 사료된다.

Abstract

This paper suggests a method for optimal power assignment of the satellite transponder input carriers in the Multi-level & Multi-bandwidth system. The interference and the noise effects analyzed for the optimal power assignment are intermodulation product caused by the nonlinear transponder characteristics, adjacent channel interference, co-channel interference, and thermal noise in the satellite link. The Fletcher-Powell algorithm is used to determine the optimal input carrier power. The performance criteria for optimal power assignment is classified into 4 categories according to the CNR of destination receiver earth station to meet the requirement for various satellite link environment. We have performed mathematical analysis of objective functions and their derivatives for use in the Fletcher-Powell algorithm, and presented various simulation results based on mathematical analysis. Since the satellite link performance is affected by various interference and noise effects in the satellite link, it is meaningful to model and analyze these effects in a unified manner and present the method for optimal power assignment of transponder input carriers.

* 正會員, 成均館 大學校 電子工學科
(Dept. of Elec. Eng., Sung Kyun Kwan Univ.)

接受日字: 1994年8月4日, 수정완료일: 1995年9월5일

I. 서론

위성 링크는 그 성격상 상향링크(Up-Link), 하향 링크(Down-Link), 및 위성중계기의 비선형성을 동시에 고려해 주어야 하는 복합적인 시스템이다. 그러므로 위성 망의 효율적 이용을 위해서는 상·하향 링크 및 위성체에서 발생하는 다양한 간섭 및 잡음 효과의 분석이 요구된다.

다수의 입력반송파가 위성중계기에 의해 공통증폭될 때 특정 반송파의 전력을 다른 입력반송파에 비해 상대적으로 증가시키면 특정 반송파의 수신성능은 상당한 성능개선을 얻을 수 있으나 특정 반송파를 제외한 다른 반송파들은 출력전력이 제한되기 때문에 상대적으로 전체적인 수신 성능이 저하된다. 또한 각각의 반송파 전력을 전체적으로 증가시키면 열잡음, 강우효과 등 몇몇 간섭원에 대해서는 성능이 개선되지만 위성중계기는 포화영역에서 동작하게 된다. 위성중계기가 포화영역에서 동작하게 되는 경우 중계기의 비선형성에 의해 발생하는 혼변조적의 전력이 증가하게 되어 전체적인 수신성능은 오히려 저하될 수도 있다. 그러므로 한정된 위성중계기 출력전력을 이용하여 각각의 수신지구국에서 요구하는 수신성능을 얻기 위해서는 각 입력반송파 전력의 최적 전력 할당은 매우 중요시 된다. 이와 같은 전력의 최적할당을 위한 최적전력할당 방안이 문헌^{[1][2]}에서 제시되고 있지만 링크해석에 있어 위성 통신시스템 특성이나 링크환경에 따라 매우 단순화된 모델을 사용하였다.

이와 같은 배경으로 본 논문에서는 다중레벨 및 다중대역폭(Multi-level & Multi-bandwidth) 시스템에서 다양한 간섭 및 잡음효과(인접채널간섭(ACI), 공동 채널간섭(CCI), 혼변조적(IMP), 열잡음, 강우효과 등)를 고려한 위성중계기 입력반송파 전력의 최적 할당 방안을 제시한다. 최적의 입력반송파 전력 할당을 위한 알고리즘으로는 수학적 해석이 요구되는 Fletcher-Powell 최적화 알고리즘^[7]을 적용하였다. 알고리즘 적용을 위해 각 간섭 및 잡음효과를 수학적으로 분석하였으며, 또한 입력반송파 진폭에 대한 편미분 성분의 해석을 수행하였다. 그리고 최적 전력 할당을 위한 성능기준으로는 다양한 위성링크 환경에 대처하기 위하여 최종 수신지구국에서의 CNR을 기준으로 4 가지 성능기준을 적용하였다. 또한 각 성능기준을 알고리즘에 적용하기 위해서 요구되는 목적함수의 구

성 및 목적함수의 편미분에 관한 세부적인 수학적 해석을 제시하였으며, 이러한 수학적 해석을 적용한 컴퓨터 시뮬레이션 결과를 4 가지 성능기준 및 다양한 위성 링크환경에 따라 제시하였다.

II. 목적함수 구성 및 편미분 해석

Fletcher-Powell 알고리즘을 적용하기 위해서는 최적화 하고자 하는 목적에 따라 목적함수를 구성하여야 하고, 목적함수의 편미분에 대한 수학적 해석이 요구된다. 본 논문에서는 최적화를 위한 성능기준으로서 최종 수신지구국에서 요구되는 C/N(Carrier-to-Noise ratio)을 기준으로 다음의 4 가지를 설정하였다.

- ① 각 반송파의 요구되는 C/N이 동일한 경우.
- ② 각 반송파의 요구되는 C/N이 기준 C/N과 동일한 경우.
- ③ 각 반송파의 요구되는 C/N이 상대적인 비를 가지는 경우.
- ④ 각 반송파의 요구되는 C/N이 기준 C/N과 상대적인 비를 가지는 경우.

위의 4 가지 성능기준을 만족할 수 있도록 목적함수의 구성이 요구되며 또한 목적함수의 편미분 해석이 요구된다. 목적함수 구성에서 독립변수는 최적 할당의 대상이 중계기 입력반송파 전력임을 고려하여 입력반송파 진폭으로 구성되어진다.

각 성능기준에 따른 목적함수의 구성 및 목적함수의 편미분에 대한 수학적 해석은 다음과 같다.

- 1. 각 반송파의 요구되는 C/N이 동일한 경우.

$$F(A_1, A_2, \dots, A_n) = \sum_{p=1}^N \sum_{q=1}^N \left(\left(\frac{C}{N}(p) \right) - \left(\frac{C}{N}(q) \right) \right)^2 \tag{1}$$

여기서, N은 입력반송파 갯수, A_1, A_2, \dots, A_n 는 입력반송파의 진폭을 의미하며, $C/N(\cdot)$ 각 반송파에 대한 최종 수신지구국에서의 반송파 대 잡음비를 나타낸다.

수식(1)을 분석해 보면 각 반송파에 대한 최종 수신지구국 C/N 값의 제곱차로 구성되어 있으므로 목적함수의 최소값을 Fletcher-Powell 알고리즘을 이용하

여 구하면 원하는 목적에 적합한 위성중계기 입력 반송파 전력을 최적으로 할당할 수 있다. 이러한 목적 함수에 대한 편미분 성분은 수식(2)와 같이 구할 수 있다.

$$\frac{\partial F(A_1, A_2, \dots, A_n)}{\partial A_i} = \sum_{p=1}^N \sum_{q=1}^N 2 \left(\left(\frac{C}{N}(p) \right) - \left(\frac{C}{N}(q) \right) \right) \left(\frac{\partial \left(\frac{C}{N}(p) \right)}{\partial A_i} - \frac{\partial \left(\frac{C}{N}(q) \right)}{\partial A_i} \right) \quad (2)$$

2. 각 반송파의 요구되는 C/N이 기준 C/N과 동일한 경우.

② 번째의 성능기준은 ① 번째의 성능기준과 매우 유사한 점을 가지고 있다. 차이점은 최종 수신단의 C/N이 기준 C/N과 동일한 C/N 값을 가져야 한다는 점이다. 이러한 성능기준에 대한 목적함수의 구성은 다음과 같다.

$$F(A_1, A_2, \dots, A_n) = \sum_{p=1}^N \sum_{q=1}^N \left(\left(\frac{C}{N}(p) \right) - \left(\frac{C}{N}(q) \right) \right)^2 + \left(\frac{C}{N}(p) - Ref. \right)^2 + \left(\frac{C}{N}(q) - Ref. \right)^2 \quad (3)$$

여기서, Ref.은 기준이 되는 수신지구국의 C/N (Reference C/N) 이다.

수식(3)의 두 번째 항이 기준이 되는 수신지구국의 C/N을 목적함수에서 나타내고 있다. 즉, 최종 수신지구국 C/N 값의 제곱차와 기준 수신지구국 C/N과 최종 수신지구국 C/N 값의 제곱차에 대한 합으로 구성 되어진다. 이러한 목적함수에 대한 편미분 성분의 수학적 해석은 수식(4)와 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial F(A_1, A_2, \dots, A_n)}{\partial A_i} &= \sum_{p=1}^N \sum_{q=1}^N 2 \left(\left(\frac{C}{N}(p) \right) - \left(\frac{C}{N}(q) \right) \right) \cdot \left(\frac{\partial \left(\frac{C}{N}(p) \right)}{\partial A_i} - \frac{\partial \left(\frac{C}{N}(q) \right)}{\partial A_i} \right) \\ &+ 2 * \left(\frac{C}{N}(p) - Ref. \right) \left(\frac{\partial \left(\frac{C}{N}(p) \right)}{\partial A_i} \right) \\ &+ 2 * \left(\frac{C}{N}(q) - Ref. \right) \left(\frac{\partial \left(\frac{C}{N}(q) \right)}{\partial A_i} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

3. 각 반송파의 요구되는 C/N이 상대적인 비를 가지는 경우.

③ 번째의 성능기준도 ① 번째의 성능기준과 매우 유사한 점을 가지고 있다. 차이점은 최종 수신지구국의 C/N 이 서로 상대적인 비를 가지고 있다는 점이다.

$$F(A_1, A_2, \dots, A_n) = \sum_{p=1}^N \sum_{q=1}^N \left(g(p) \left(\frac{C}{N}(p) \right) - g(q) \left(\frac{C}{N}(q) \right) \right)^2 \quad (5)$$

여기서, $g(\cdot)$ 는 상대적인 비(weighting factor)를 나타내는 함수이다. 상대적인 비와 최종 수신지구국 C/N과 곱에 대한 제곱차를 목적함수의 값으로 설정하였다.

목적함수에 대한 편미분은 수식(6)과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial F(A_1, A_2, \dots, A_n)}{\partial A_i} &= \sum_{p=1}^N \sum_{q=1}^N 2 \left(g(p) \left(\frac{C}{N}(p) \right) - g(q) \left(\frac{C}{N}(q) \right) \right) \\ &\left(g(p) \left(\frac{\partial \left(\frac{C}{N}(p) \right)}{\partial A_i} \right) - g(q) \left(\frac{\partial \left(\frac{C}{N}(q) \right)}{\partial A_i} \right) \right) \end{aligned} \quad (6)$$

수식(6)에서 최종 수신지구국의 C/N에 대한 상대적인 비를 나타내는 $g(\cdot)$ 는 편미분 해석에서 입력진폭에 대해 무관함으로 상수로 해석한다.

4. 각 반송파의 요구되는 C/N이 기준 C/N과 상대적인 비를 가지는 경우.

④ 번째의 성능기준은 ③ 번째의 성능기준과 유사하며, ① 번째와 ② 번째의 관계는 ③ 번째와 ④ 번째의 관계와 유사하다고 볼 수 있다. 그러므로 ③ 번째의 성능기준에 기준 C/N을 부가하여 목적함수를 구성하여야 한다.

$$\begin{aligned} F(A_1, A_2, \dots, A_n) &= \sum_{p=1}^N \sum_{q=1}^N \left(g(p) \left(\frac{C}{N}(p) \right) - g(q) \left(\frac{C}{N}(q) \right) \right)^2 \\ &+ \left(g(p) \frac{C}{N}(p) - Ref. \right)^2 + \left(g(q) \frac{C}{N}(q) - Ref. \right)^2 \end{aligned} \quad (7)$$

여기서, Ref.은 기준이 되는 수신 지구국의 C/N (Reference C/N)을 의미한다. 수식(7)에서 두 번째 항이 기준 반송파의 C/N을 목적함수에 부가시켜 주고 있다. 목적함수의 편미분은 수식(8)과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial F(A_1, A_2, \dots, A_n)}{\partial A_i} &= \sum_{p=1}^N \sum_{q=1}^N 2 \left(g(p) \left(\frac{C}{N}(p) \right) - g(q) \left(\frac{C}{N}(q) \right) \right) \\ &\cdot \left(g(p) \frac{\partial \left(\frac{C}{N}(p) \right)}{\partial A_i} - g(q) \frac{\partial \left(\frac{C}{N}(q) \right)}{\partial A_i} \right) \\ &+ 2 * \left(g(p) \frac{C}{N}(p) - Ref. \right) \left(\frac{\partial \left(g(p) \frac{C}{N}(p) \right)}{\partial A_i} \right) \\ &+ 2 * \left(g(q) \frac{C}{N}(q) - Ref. \right) \left(\frac{\partial \left(g(q) \frac{C}{N}(q) \right)}{\partial A_i} \right) \end{aligned} \quad (8)$$

목적함수의 구성 및 목적함수의 편미분 해석에서 제 1항 C/N의 구성은 고려하고자하는 위성링크의 잠음 및 간섭 효과에 따라 달라진다.

III. 수학적 해석

본 장에서는 앞장에서 제시한 목적함수의 실제적인 적용을 위해 세부적인 수학적 해석을 제시한다. 수학적 해석은 부가되는 간섭 및 잡음효과에 따른 전체 C/N의 구성과 각각의 간섭 및 잡음 효과의 수학적 묘사 및 알고리즘 적용을 위한 편미분 해석을 제공한다. 편미분 해석은 위성중계기 입력반송파 진폭을 독립 변수로 설정하여 적용하였다. 본 장의 각 절에서는 부가되는 잡음 및 간섭에 따른 C/N의 구성 및 편미분 해석을 수행하였다. 특히, 혼변조적의 경우를 예를 들어 국부적인 결과를 제시하였고 전체적인 시뮬레이션 결과는 IV 장에서 제시하였다.

1. 혼변조적

FDMA 위성시스템에서 혼변조적 성분은 위성링크 성능에 매우 지배적인 영향을 미친다. 알고리즘 적용을 위한 혼변조적 효과의 수학적 모델은 위성 중계기의 비선형 특성을 포함하여야 함으로 수학적 해석이 매우 복잡하며, 시뮬레이션 수행에 있어 매우 많은 수행 시간을 요구한다. 일반적으로 혼변조적 효과는 영향력에 따라 여러 가지 형태로 분류할 수 있는데 본 논문에서는 수학적 해석의 용이성 및 혼변조적의 영향력을 고려하여 혼변조적 성분의 계산은 3-rd Dominant, 3-rd Specific 성분만을 계산하였다. 실제적으로 3 차 이상의 고차 혼변조적 성분은 무시 하여도 가능할 만큼 그 영향력이 미비하다^{[11][5]}. 목적함수 구성에서 C/N은 고려하고자하는 잡음 및 간섭효과가 혼변조적 효과뿐이라는 가정에서 C/IMP로 구성된다. 위성중계기 입력반송파 진폭에 대한 혼변조적 성분의 편미분 해석은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \left(\frac{C}{IMP} \right)}{\partial A_i} = \frac{dsi(A_i) \left[\frac{IMP^2}{2} \right]_{k-th BW} - \left| \frac{B_k}{2} \right| \dim p(A_i)}{\left(\left| \frac{IMP^2}{2} \right| \right)_{k-th BW}^2} \quad (9)$$

여기서, B_k 는 위성중계기의 출력진폭을 의미하고, $dsi(A_i)$ 은 입력진폭에 대한 위성중계기 출력전력의 편미분 성분을 의미한다.

IMP는 혼변조적 성분의 진폭, $\dim p(A_i)$ 은 혼변조적에 대한 편미분 성분을 의미한다. 그리고 $k-th BW$ 는 k 번째 반송파의 대역폭을 의미한다. 그러므로 목적함수에 적용하기 위해서는 수식 (9)에서

$B_k, dsi(A_i), IMP, \dim p(A_i)$ 성분을 얻어야 한다. 위성중계기 비선형특성을 Bessel 함수를 이용하여 근사화하면 중계기 출력단에서의 신호성분에 대한 수학적 정의는 다음과 같다.

$$B_l = M[0, 0, \dots, 1^{l-th}, 0, 0] \quad (10)$$

$$= \sum_{s=1}^l b_s J_1(\alpha s A_i) \cdot \prod_{p=1}^n J_0(\alpha s A_p) \quad (p \neq l)$$

출력진폭에 대한 편미분은 입력 진폭에 따라 Bessel 함수를 편미분하여 다음과 같이 해석할 수 있다.

▶ $A_l \neq A_k$

$$\frac{\partial B_l}{\partial A_k} = - \sum_{s=1}^l b_s J_1(\alpha s A_i) (\alpha s) J_1(\alpha s A_k) \cdot \prod_{p=1}^n J_0(\alpha s A_p) \quad (p \neq k, l) \quad (11)$$

▶ $A_l = A_k$

$$\frac{\partial B_l}{\partial A_k} = \frac{1}{2} \sum_{s=1}^l b_s (\alpha s) [J_0(\alpha s A_k) - J_2(\alpha s A_k)] \cdot \prod_{p=1}^n J_0(\alpha s A_p) \quad (p \neq l) \quad (12)$$

혼변조적 성분의 해석 및 편미분 해석은 혼변조적 형태에 따라 분류하여 다음과 같이 구성할 수 있다.

$$\left. \frac{\partial \left(\frac{IMP^2}{2} \right)}{\partial A_i} \right|_{k-th BW} = (PP + QQ) \Big|_{k-th BW} = \dim p(A_i) \quad (13)$$

여기서, P, Q 는 혼변조적 진폭성분의 Real 과 Imaginary 항이다. P, Q 는 편미분 성분의 Real 과 Imaginary 항이다. 수식(13)에서 P, Q 을 얻기 위하여 혼변조적 성분을 편미분 한다. 3-rd Dominant 혼변조적 성분을 수식(14)와 같이 정의한다.

$$IM_{3d}(A_1, A_2, \dots, A_n) = - \sum_{s=1}^l b_s J_1(\alpha s A_X) J_1(\alpha s A_Y) J_1(\alpha s A_Z) \cdot \prod_{p=1}^n J_0(\alpha s A_p) \quad (p \neq X, Y, Z) \quad (14)$$

여기서, IM_{3d} 는 3-rd Dominant 혼변조적, J_n 는 n 차 제1종 Bessel 함수를 의미한다. 입력진폭에 따라 3-rd Dominant 혼변조적 성분의 편미분 값을 구하면 다음과 같다.

▶ $A_i \neq A_X, A_Y, A_Z$ 경우

$$\frac{\partial IM_{3d}}{\partial A_i} = \sum_{s=1}^L b_s J_1(\alpha s A_X) J_1(\alpha s A_Y) J_1(\alpha s A_Z) (\alpha s) J_1(\alpha s A_i) \cdot \Pi_{p=1}^n J_0(\alpha s A_p) \quad (p \neq X, Y, Z, i) \quad (15)$$

▶ $A_i = A_X$ 경우

$$\frac{\partial IM_{3d}}{\partial A_i} = -\frac{1}{2} \sum_{s=1}^L b_s (\alpha s) [J_0(\alpha s A_X) - J_2(\alpha s A_X)] J_1(\alpha s A_Y) \cdot J_1(\alpha s A_Z) \Pi_{p=1}^n J_0(\alpha s A_p) \quad (p \neq X, Y, Z) \quad (16)$$

▶ $A_i = A_Y$ 경우

$$\frac{\partial IM_{3d}}{\partial A_i} = -\frac{1}{2} \sum_{s=1}^L b_s (\alpha s) J_1(\alpha s A_X) [J_0(\alpha s A_Y) - J_2(\alpha s A_Y)] \cdot J_1(\alpha s A_Z) \Pi_{p=1}^n J_0(\alpha s A_p) \quad (p \neq X, Y, Z) \quad (17)$$

▶ $A_i = A_Z$ 경우

$$\frac{\partial IM_{3d}}{\partial A_i} = -\frac{1}{2} \sum_{s=1}^L b_s (\alpha s) J_1(\alpha s A_X) J_1(\alpha s A_Y) \cdot [J_0(\alpha s A_Z) - J_2(\alpha s A_Z)] \Pi_{p=1}^n J_0(\alpha s A_p) \quad (p \neq X, Y, Z) \quad (18)$$

3-rd Specific 형태의 혼변조적 성분을 수식 (19) 와 같이 정의할 수 있다.

$$IM_{3s}(A_1, A_2, \dots, A_n) = -\sum_{s=1}^L b_s J_2(\alpha s A_X) J_1(\alpha s A_Y) \cdot \Pi_{p=1}^n J_0(\alpha s A_p) \quad (p \neq X, Y) \quad (19)$$

여기서, IM_{3s} 는 3rd-Specific 형태의 혼변조적 성분의 임력진폭에 따라 3-rd Specific 형태의 혼변조적 성분을 편미분하면 다음과 같다.

▶ $A_i \neq A_X, A_Y$ 경우

$$\frac{\partial IM_{3s}}{\partial A_i} = \sum_{s=1}^L b_s J_2(\alpha s A_X) J_1(\alpha s A_Y) (\alpha s) J_1(\alpha s A_i) \cdot \Pi_{p=1}^n J_0(\alpha s A_p) \quad (p \neq X, Y, i) \quad (20)$$

▶ $A_i = A_X$ 경우

$$\frac{\partial IM_{3s}}{\partial A_i} = -\frac{1}{2} \sum_{s=1}^L b_s (\alpha s) [J_1(\alpha s A_X) - J_3(\alpha s A_X)] J_1(\alpha s A_Y) \cdot \Pi_{p=1}^n J_0(\alpha s A_p) \quad (p \neq X, Y) \quad (21)$$

▶ $A_i = A_Y$ 경우

$$\frac{\partial IM_{3s}}{\partial A_i} = -\frac{1}{2} \sum_{s=1}^L b_s J_2(\alpha s A_X) (\alpha s) [J_0(\alpha s A_Y) - J_2(\alpha s A_Y)] \cdot \Pi_{p=1}^n J_0(\alpha s A_p) \quad (p \neq X, Y) \quad (22)$$

1) 결과 검토

최적 전력 할당 알고리즘 적용을 위한 초기 전력 할당 및 중계기 환경을 아래의 표 1에 제시하였다.

표 1. 초기 전력 할당
Table 1. Initial power assignment.

Objective Function Value : 36515.7			
Power [dB]	Freq. [MHz]	BW [MHz]	C/IM [dB]
-15.0	1.0	1.0	19.978
-15.0	2.0	1.0	17.901
-15.0	3.0	1.0	17.492
-17.0	4.0	1.0	14.751
-17.0	5.0	1.0	15.622
-17.0	6.0	1.0	16.851

표 1에서 Objective Function Value는 초기 전력 할당에서의 목적함수 값. Power, Freq., BW는 임력반송파 전력의 backoff, 반송파 주파수 위치, 반송파 대역폭을 의미한다. II장에서 제시한 성능기준에 따른 결과를 표 2 와 그림 1에 제시하였다.

표 2. 성능 기준에 따른 최적 전력 할당
Table 2. Optimal power assignment in accordance with the performance criteria.

성능 기준	1	2	3	4	
기준 C/N [dB]		20		16	
	입력 전력	입력 전력	입력 전력	상대적 인 비	상대적 인 비
최적입력	-16.73	-20.16	-17.61	-1.0	-18.02
전력 및 상대적인 비 [dB]	-15.51	-18.91	-15.68	0.0	-16.06
	-14.94	-18.33	-14.36	1.0	-16.03
	-14.92	-18.31	-14.01	1.5	-13.81
	-15.43	-18.83	-15.98	-0.5	-14.94
	-16.27	-19.69	-17.29	-1.0	-15.84

표 2의 상대적인 비에서 0.0 은 기준이 되는 반송파

를 의미하며, 기준 C/N은 성능기준 2, 4에서 적용되는 항으로서 기준이 되는 반송파의 C/N을 나타낸다. 아래의 그림 1은 최적 전력 할당에 따른 전체 C/N의 결과를 제시하였다.

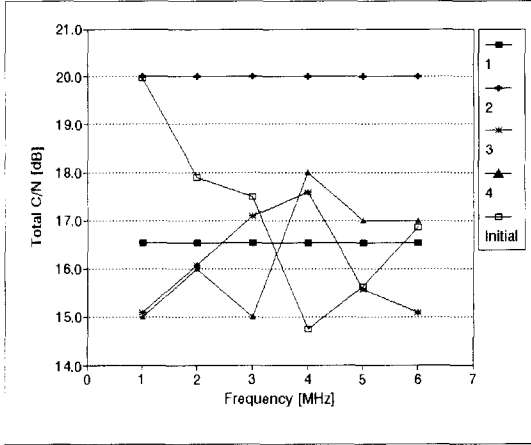


그림 1. 성능 기준에 따른 전체 C/N의 비교
Fig. 1. Comparison of total C/N in accordance with the performance criteria.

위 그림의 범례에서 1, 2, 3, 4 및 initial은 성능 기준과 초기할당에서의 결과를 나타낸다. 성능기준 1에서 전체 C/N은 16.5 dB로 균일한 값을 가지게 되며 이때 전력할당은 중계기의 중앙 부분이 가장자리에 비해 상대적으로 높은 전력을 가지게 된다. 이러한 전력할당은 혼변조적 왜곡이 중계기 중앙 부분에서 증가되기 때문에 동일한 C/N을 얻기 위해서는 중앙 부분의 반송파전력을 높게 할당하게 된다.

성능기준 2에서는 기준 C/N인 20dB에 동일한 값을 얻기 위하여 전체적으로 전력을 낮게 할당함으로써 혼변조적 왜곡을 감소시켰다. 성능기준 3, 4에서도 요구되는 상대적인 비에 따라 전체 C/N이 결정됨을 보이고 있다.

2. 인접채널간섭

앞 절에서는 혼변조적 효과만을 고려한 입력 반송파 전력의 최적 할당방안을 제시하였지만 본 절에서는 인접채널간섭과 혼변조적 효과를 동시에 고려해 줄 수 있는 위성중계기 입력전력의 최적 할당방안을 제시한다. 인접채널간섭 효과의 분석은 원하는 채널에 인접한 상·하향 2개의 채널만을 고려한다. 상·하향 2개의

채널 이외에도 간섭효과는 발생하지만 인접한 채널에 의해 발생하는 효과에 비해 미비함으로 무시하여도 가능하다고 사료된다. 인접채널간섭 및 혼변조적 효과를 동시에 고려해 줄 수 있는 전력 최적화를 위한 목적함수의 구성은 혼변조적 효과만을 고려한 목적함수의 구성과 동일하다. 차이점은 최종 수신지구국에서의 C/N을 계산하는데 있어 혼변조적의 전력에 인접채널간섭의 전력을 부가시키는 것이다. 전체 C/N의 구성은 다음과 같다.

$$\left(\frac{C}{N}\right) = \left[\left(\frac{C}{IMP}\right)^{-1} + \left(\frac{C}{ACI}\right)^{-1}\right]^{-1} \quad (23)$$

ACI 성분의 부가에 따라 C/N의 편미분 성분은 다음과 같이 달라진다.

$$\frac{\partial \left(\frac{C}{N}(k)\right)}{\partial A_i} = \frac{ds_i(A_i) [IMP + ACI]_{k-th BW}}{([IMP + ACI]_{k-th BW})^2} - \frac{\left[\frac{|B_k|^2}{2}\right] [\dim p(A_i) + daci(A_i)]}{([IMP + ACI]_{k-th BW})^2} \quad (24)$$

수식(24)에서 $ds_i(A_i)$, IMP , B_k , $\dim p(A_i)$ 성분은 이미 세부적으로 제시하였고 본 절에서는 ACI , $daci(A_i)$ 성분을 수식(25)와 수식(26)과 같이 얻을 수 있다.

$$\left[\frac{|B_{k-1}|^2}{2} + \frac{|B_{k+1}|^2}{2}\right]_{k-th BW} = ACI \quad (25)$$

$$\left[\frac{\partial \left(\frac{|B_{k-1}|^2}{2}\right)}{\partial A_i} + \frac{\partial \left(\frac{|B_{k+1}|^2}{2}\right)}{\partial A_i}\right]_{k-th BW} = daci(A_i) \quad (26)$$

수식(11)과 수식(12)에서 입력신호진폭에 대한 출력신호전력의 편미분 성분은 이미 해석하였다.

3. 공동채널간섭

본 절에서 전력최적화를 위해 고려되는 간섭효과는 공동채널간섭, 인접채널간섭, 혼변조적이다. 이미 인접채널간섭과 혼변조적의 분석 및 적용 방안을 제시하였으므로 본 절에서는 공동채널간섭의 수학적 해석 및 적용방안을 제시한다. 전체 C/N의 구성은 다음과 같다.

$$\left(\frac{C}{N}\right) = \left[\left(\frac{C}{IMP}\right)^{-1} + \left(\frac{C}{ACI}\right)^{-1} + \left(\frac{C}{CCI}\right)^{-1}\right]^{-1} \quad (27)$$

여기서, IMP 는 혼변조적, ACI 는 인접채널간섭, CCI 는 공동채널간섭을 의미한다.

C/N에 대한 편미분 성분을 구하면 수식(28)과 같다.

$$\frac{\partial \left(\frac{C}{N} (k) \right)}{\partial A_i} = \frac{dci(A_i) [IMP + ACI + CCI]_{k-th BW}}{([IMP + ACI + CCI]_{k-th BW})^2} \quad (28)$$

$$- \frac{[\frac{|B_k|^2}{2}] [dim p(A_i) + daci(A_i)]}{([IMP + ACI + CCI]_{k-th BW})^2}$$

수식(28)을 분석하여 보면 공동채널간섭 성분에 대한 편미분 성분이 존재하지 않음을 알 수 있다. 목적 함수에 대한 편미분은 위성중계기의 입력전폭에 대한 편미분이다. 공동채널간섭은 입력전폭에 영향을 받지 않기 때문에 수학적으로 편미분 항을 구할 때에는 상수항으로 처리된다.

4. 상·하향 열잡음

위성링크에서 상·하향 열잡음 효과의 분석은 지구국과 위성 수신기의 수신성능지수(G/T : Gain-to-noise Temperature)의 특성을 포함하고 있다. 상향 링크에서의 열잡음 효과는 위성수신기, 하향링크에서의 열잡음 효과는 수신지구국의 수신기 특성을 고려한다고 볼 수 있다. 본 절에서는 이전까지 분석한 잡음효과(혼변 조정, 공동채널간섭, 인접채널간섭)에 부가적으로 상·하향 링크에서의 열잡음 효과를 전력 최적화를 위해 고려하는 간섭효과에 포함하였다. 상·하향 링크에서의 열잡음 효과를 분석하여 보면 다음과 같다. 하향링크 열잡음에 의한 C/N은 수식 (29)와 같이 결정된다.

$$(C/N_{i-dn}) = EIRP_{sat} - Obk. - L_{dn} + (G/T)_{ES} - k - BW \text{ [dB]} \quad (29)$$

여기서, $EIRP_{sat}$: 중계기 출력 포화 EIRP [dBW]

$Obk.$: 중계기 출력 반송파의 Backoff [dB]

$(G/T)_{ES}$: 수신 지구국의 (G/T) [dB/k]

L_{dn} : 하향링크 총 손실 [dB]

k : Boltzmann 의 상수 [dBW/k-Hz]

BW : 각 반송파의 대역폭 [dB/Hz]

상향링크 열잡음에 의한 C/N은 수식(30)을 이용하여 얻을 수 있다.

$$(C/N)_i = P_{in} - Ibk. - T_n - k - BW \text{ [dB]} \quad (30)$$

여기서, P_{in} : 중계기 입력 포화 전력 [dBW]

$Ibk.$: 중계기 입력반송파의 Backoff [dB]

T_n : 잡음 온도 [dB-k]

목적함수 및 목적함수의 편미분 성분은 앞에서 제시한 것과 동일하다. 그러나 C/N은 상·하향 열잡음 효과를 포함하여 구성하여야 한다. C/N의 구성은 수식 (31)과 같다.

$$\left(\frac{C}{N} \right) = \left[\left(\frac{C}{IMP} \right)^{-1} + \left(\frac{C}{ACI} \right)^{-1} + \left(\frac{C}{CCI} \right)^{-1} + \left(\frac{C}{N_i-up} \right)^{-1} + \left(\frac{C}{N_i-dn} \right)^{-1} \right]^{-1} \quad (31)$$

여기서, $\frac{C}{N_i-up}$ 은 상향링크 열잡음, $\frac{C}{N_i-dn}$ 은 하향링크 열잡음에 의한 C/N을 의미한다. 상·하향 열잡음에 의한 C/N의 편미분은 다음과 같다.

$$\frac{\partial (C/N_{i-dn})}{\partial A_i} = EIRP_{sat} - \frac{\partial (Obk.)}{\partial A_i} - L_{dn} + (G/T)_{ES} - k - BW \quad (32)$$

$$\frac{\partial (C/N_{i-up})}{\partial A_i} = P_{in} - \frac{\partial (Ibk.)}{\partial A_i} - T_n - k - BW \quad (33)$$

수식 (33)에서 1 번째 반송파를 제외한 모든 반송파는 편미분 계산에서 편미분 변수에 무관함으로 상수항으로 처리한다.

5. 강우 효과

본 논문에서 고려하고자 하는 모든 간섭효과를 고려한 전력 최적화 방안을 제시한다. 고려되는 간섭효과는 혼변조정, 인접채널간섭, 공동채널간섭, 상·하향 열잡음, 강우효과이다. 다른 간섭효과는 이미 해석하였고 본 장에서는 강우효과의 영향을 분석한다. 강우에 의한 신호감쇠 효과가 타 간섭효과의 C/N에 미치는 영향을 분석해보면 인접채널간섭, 공동채널간섭, 혼변조적에 의한 C/N에는 영향을 미치지 않는다. 즉, 강우효과는 신호와 간섭전력에 동일하게 전력의 감쇠를 유발한다. 그러나 상·하향링크에서의 열잡음에 의한 C/N에는 신호 전력만을 감쇠시키기 때문에 간섭효과중 상·하향링크에서의 열잡음 효과에 의한 C/N의 값에 대한 변화를 분석하여야 한다. 본 논문에서 최적화 하고자 하는 전력이 위성중계기의 입력전력이므로 강우효과에 의한 상향링크 열잡음에서의 C/N 값에는 변화는 없다. 그러나 위성중계기의 입력전력을 이용하여 송신지구국의 EIRP를 구하면 강우효과를 포함한 경우와 포함하지 않는 경우에 차이가 있음을 알 수 있다. 수학적 해석을 이용하여 예를 들면 다음과 같다.

▶ 강우효과를 고려하는 경우

$$EIRP_{E.S} = I_p. - G_{sat} + L_{up} + R_{up} \text{ [dB]} \quad (34)$$

▶ 강우효과를 고려하지 않는 경우

$$EIRP_{E.S} = I_p - G_{sat} + L_{up} \text{ [dB]} \quad (35)$$

여기서, $EIRP_{E.S}$: 송신지구국 EIRP [dBW]

I_p : 중계기 입력단에서의 반송파 전력 [dB]

G_{sat} : 위성안테나 이득 [dB/k]

L_{up} : 상향링크 총 손실 [dB]

R_{up} : 강우에 의한 상향링크 신호감쇠 [dB]

강우효과가 하향링크 열잡음에 의한 C/N 값에 미치는 영향을 분석하여 보면, 수식(36)과 같이 해석할 수 있다.

$$(C/N_{i-dn}) = EIRP_{sat} - Obk - L_{dn} + (G/T)_{ES} - k - BW - R_{dn} \text{ [dB]} \quad (36)$$

여기서, R_{dn} : 강우에 의한 신호의 감쇠 [dB]

$EIRP_{sat}$: 중계기 출력 포화 EIRP [dBW]

본 논문에서는 여러 강우모델 중에서 CCIR 강우모델을 적용하였으며 강우 효과 중 신호전력의 감쇠만을 적용하였다.

IV. 시뮬레이션 결과 검토

혼변조적만을 고려한 국부적인 결과는 이미 앞장에서 제시하였다. 본 장에서는 본 논문에서 고려하고자 하는 모든 간섭 및 잡음(혼변조적, 인접채널간섭, 공동채널간섭, 열잡음 및 강우효과)을 고려한 최적전력할당 결과를 제시한다. 초기전력할당은 다음의 표 3과 같이 설정하였다.

표 3. 초기 전력 할당
Table 3. Initial power assignment.

Objective Function Value : 257429.0								
Power [dB]	Freq. [MHz]	BW [MHz]	C/N _{t up} [dB]	C/IM [dB]	C/ACI [dB]	C/CCI [dB]	C/N _{t-dn} [dB]	Total C/N [dB]
-20.0	1.00	1.00	38.07	25.12	29.02	30.20	33.80	22.33
-20.0	2.20	1.00	38.07	23.45	26.01	29.81	33.80	20.63
-20.0	3.40	1.00	38.07	22.97	26.01	29.78	33.80	20.37
-20.0	4.60	1.00	38.07	23.29	29.02	29.75	33.80	21.20
-26.0	5.60	0.50	35.08	19.94	23.68	27.00	21.77	16.31
-26.0	6.10	0.50	35.08	20.90	24.10	25.36	21.77	16.60
-26.0	6.60	0.50	35.08	22.34	24.10	28.67	21.77	17.44
-26.0	7.10	0.50	35.08	21.47	27.11	25.40	21.77	17.23

초기전력할당에서 전력 및 대역폭은 2 가지 유형을 이루고 있으며 최악의 간섭원은 혼변조적과 하향링크 열잡음이며 최소, 최대 total C/N의 차는 6.02 dB임을 알 수 있다. 그러므로 요구되는 성능기준에 따른 최적전력할당은 혼변조적 및 하향링크 열잡음에 민감한 변화를 보일 것이다. 표 3의 초기전력할당을 4 가지 성능기준에 따라 적용한 결과로서 입력반송파의 최적전력할당과 최적전력할당에서의 전체 C/N을 제시하면 다음의 표 4 및 그림 2와 같다.

표 4. 성능 기준에 따른 최적 전력 할당
Table 4. Optimal power assignment in accordance with the performance criteria.

성능기준	1	2	3		4	
기준 C/N [dB]		20			18.5	
최적 입력 전력 및 상대적인 비 [dB]	입력 전력	입력 전력	입력 전력	상대적 인비	입력 전력	상대적 인비
	-20.90	-24.91	-22.21	-1.0	-20.96	-1.0
	-19.65	-23.77	-20.01	0.0	-19.76	-1.0
	-19.13	-23.44	-18.72	1.0	-18.18	0.0
	-19.33	-23.73	-20.47	-1.0	-17.46	1.0
	-21.40	-23.85	-22.92	-1.5	-21.36	-1.0
	-21.54	-23.32	-20.88	1.0	-22.12	-1.5
	-22.08	-23.73	-21.34	1.0	-20.65	1.0
	-22.15	-24.14	-23.12	-1.0	-20.63	1.0

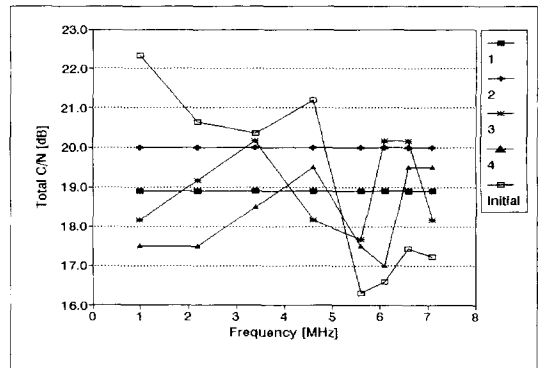


그림 2. 성능기준에 따른 전체 C/N의 비교
Fig. 2. Comparison of total C/N in accordance with the performance criteria.

표 3의 성능기준과 그림 2의 범례에서 1, 2, 3, 4

는 성능기준의 종류를 나타낸다. 성능기준 1 에서의 결과는 모든 반송파의 C/N이 18.9 dB로 거의 동일한 값을 가지게 되므로 최적전력할당에서는 최대, 최소간 C/N의 차가 영(zero)으로 까지 감소함을 볼 수 있다. 최적전력할당 상태를 살펴보면 초기할당에서는 중계기 전반부의 4 개의 반송파와 후반부의 4 개의 반송파 전력의 7 dB의 차를 보이거나 모든 반송파가 동일한 C/N을 가지도록 하기 위해 반송파전력간의 비가 약 2 dB로 까지 줄어들음을 볼 수 있다. 성능기준 2에서는 기준 C/N이 20 dB 이므로 모든 반송 파의 C/N이 20 dB와 동일한 값을 가짐을 볼 수 있다. 그러므로 최대, 최소 반송 파간 C/N의 차가 영(zero)까지 감소하면서 기준 C/N을 만족하게 된다. 전력할당 상태를 보면 초기전력할당에서 지배적인 혼변조적과 하향링크 열잡음 효과를 감소시켜 전체 C/N을 증가하기 위해 전체적으로 반송파전력이 낮아져 혼변조적 효과를 감소시키면서 후반부 4 개의 반송파에 대한 하향링크 열잡음 효과를 개선하기 위해 후반부 4 개의 반송파 전력은 증가하나 상대적으로 전반부 4 개의 반송파 전력은 감소됨을 볼 수 있다. 성능기준 3, 4에서는 정성적인 설명이 매우 복잡 하게 되나 상대적인 비에 따른 최적전력 할당에서의 전체 C/N 값을 보면 성능기준을 만족함을 알 수 있고 최적전력할당도 상대적인 비의 높고 낮음과 초기전력할당에서의 간섭원을 분석해 보면 최적전력할당의 결과를 이해할 수 있다.

V. 결 론

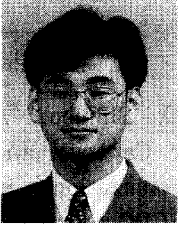
본 논문에서는 한정된 위성 가용자원인 위성전력의 효율적 사용을 위한 위성중계기 입력반송파 전력의 최적할당 방안을 제시하였다. 최적할당을 위해서 상·하향 위성링크에서 발생하는 다양한 간섭 및 잡음효과를 분석하였다. 간섭 및 잡음효과 분석은 위성링크에서 발생하는 무수히 많은 원인 중 상대적으로 통신환경에 미치는 영향이 큰 것을 선택적으로 취하였다. 최적할당을 위한 최적화 알고리즘으로는 위성 중계기의 수학적 모델 설정에 있어 중계기의 비선형성에 의해 나타나는 비선형 함수의 최적화를 얻기 위해 주로 이용되는 Fletcher-Powell 최적화 알고리즘을 적용하였다. 알고리즘 적용을 위해 각 간섭 및 잡음효과의 수학적 해석에 대한 편미분을 수행하였다. 수학적 해석을 적용한 시뮬레이션 결과는 아주 만족스러우며, 차후의 연구과

제로는 중계기 전력뿐만 아니라 한정된 중계기의 대역폭을 최적으로 이용하기 위한 반송파의 최적 주파수 배치 전략을 동시에 고려 할 수 있는 알고리즘의 개발이 요구된다.

참 고 문 헌

- [1] Lan N. Nguyen and O. Shimbo, "A Method for Transponder Capacity and Link Performance Optimization in Preassigned Multilevel SCPC Systems," IEEE Trans. on Communications, Vol. COM-29, No 3, March, 1981.
- [2] Peter Y. Chang and O. Shimbo, "Input Power Assignment of Multicarrier Systems from Given Output Power Levels," IEEE Trans. on Communications, Vol. COM-27, No.10, Oct. 1979.
- [3] O. Shimbo, *Transmission Analysis in Communication Systems*, Computer Science Press, Volume 1, 1988.
- [4] O. Shimbo, *Transmission Analysis in Communication Systems*, Computer Science Press, Volume 2, 1988.
- [5] J.C. Fuenzalida, O. Shimbo, and W.L. Cook, "Time-Domain Analysis of Intermodulation Effects by Nonlinear Amplifier," COMSAT Technical Review, Vol.3, No.1, Spring 1973.
- [6] M.J. Robusto, "INTELSAT V Transmission System Models Used for Analysis, Optimization, and Operational Control," Proc. AIAA Ninth Communications Satellite Systems Conf. Mar. 1982.
- [7] R. Fletcher and M.J.D. Powell, "A Rapidly Convergent Descent Method for Minimization," *The Computer Journal*, Vol. 6, 1963-1964, pp.163-168.
- [8] Richard W. Duesing, "Software Models for the Intelsat System," *The Computer Journal*, April 1983.

저 자 소 개



金炳均(正會員)

1992년 2월 성균관대학교 전자공학과 졸업(학사). 1994년 2월 성균관대학교 대학원 전자공학과 졸업(석사). 1994년 3월 ~ 현재 : 성균관대학교 대학원

박사과정. 주관심분야는 위성통신, 이동통신, 디지털 통신 기술 등임



崔炯辰(正會員)

1974년 2월 서울대학교 전자공학과 졸업(학사). 1976년 2월 한국과학기술원 전기전자공학과 졸업(석사). 1976년 3월 ~ 1979년 7월 주식회사 금성사 중앙연구소 근무(연구원).

1979년 9월 ~ 1982년 12월 미국 University of Southern California 전기공학과 박사(Ph.D). 1982년 10월 ~ 1989년 2월 미국 LinCom Corp. 연구원으로 근무. 1989년 3월 ~ 현재 성균관대학교 전자공학과(부교수). 주관심분야는 디지털통신, 무선통신, 이동통신, 위성통신 및 동기화 기술을 포함 한 Modem 기술 등임