

# 带宽受限下频谱分离对提高 RDSS 入站容量的影响分析\*

李井源, 李垣陵, 牟卫华, 王飞雪

(国防科技大学 电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要:** 用户入站容量是 RDSS 系统设计的一个重要指标, 主要受限于入站信号之间的多址干扰。提高扩频码速率可以增加入站容量, 但卫星转发器带宽限制了扩频码速率的最大值, 从而限制了单个扩频频谱入站信号容量最大值。在卫星转发器带宽受限情况下, 提出了采用分离扩频频谱的方法来提高入站容量, 并分别对扩频频谱分离为两个和三个的情况进行了详细分析, 得出了两种分离扩频频谱方案下扩频码速率的最优值。仿真结果表明, 在现有转发器带宽内分离为两个扩频频谱可以提高入站容量 29%, 分离为三个扩频频谱可以提高入站容量 37%。

**关键词:** 卫星无线电定位; 频谱分离; 多址干扰; 入站容量

**中图分类号:** TN914.53   **文献标识码:** A   **文章编号:** 1001-2486(2012)02-0055-04

## Analysis of spectral separation impact on RDSS System inbound capacity with bandwidth limit

LI Jingyuan, LI Yuanling, MOU Weihua, WANG Feixue

(College of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** Inbound user capacity is an important specification of RDSS system design, which is mainly limited by the inbound signal multiple access interference. To improve the spreading code rate can increase the corresponding inbound capacity. However, the satellite transponder bandwidth limits the maximum spreading code rate, which limits the maximum capacity of inbound signals with a single spread spectrum. As the satellite transponder bandwidth is limited, a spread spectrum separation method was proposed to increase inbound capacity. The situation of separating the spread spectrum into two and three was analyzed respectively. thus obtaining the optimal value of spreading code rate in the both cases. Simulation results show that the existing transponder bandwidth separated into two spreading spectrums can increase inbound capacity 29%, the spectrums which separated in to can increase inbound capacity 37%.

**Key words:** Radio Determination Satellite Service (RDSS); spectral separation; multiple access interference; inbound capacity

RDSS 业务具有快速定位、高精度授时与短报文通信的功能, 在我国未来全球卫星导航系统中是不可或缺的组成部分<sup>[1-2]</sup>。新一代 RDSS 系统最主要的特点是大容量, 包括了大容量出站和入站两个方面。RDSS 入站信号为短突发信号, 大容量入站时随着入站信号数量的增加, 入站信号重叠概率增加, 多址干扰加剧。分析表明, 卫星 G/T 值、信号接收门限载噪比以及扩频码速率确定后, 多址干扰限制了系统最大入站容量。提高扩频码速率可以进一步提高系统容量, 但由于卫星转发器带宽受限, 不能无限制提高扩频码速率。

卫星转发器带宽一定时, 如何更合理地利用转发器带宽以达到最大入站容量是新一代 RDSS 系统需要解决的重要问题。扩频码速率提高后不但提高了 RDSS 系统的入站容量, 同时也提高了

入站信号的测距精度。由于 RDSS 用户定位所需的观测量除了入站信号的测距值, 还包括系统提供的高程数据, 已有结论表明, 入站信号测距标准差在 5ns ~ 10ns 量级就能够与系统提供的高程数据误差相匹配<sup>[3]</sup>。现有 RDSS 转发器带宽为 16.5MHz<sup>[3]</sup>, 扩频码速率最大为 8.25Mcps, 该扩频码速率下入站信号测距精度远优于 5ns ~ 10ns。因此, 可以考虑适当降低扩频码速率, 在整个转发器带宽分离为几个扩频频谱, 以此通过适当降低入站信号测距精度来获得更高的入站容量。

### 1 入站信号模型

由于 RDSS 入站信号为短突发信号, 一个入站帧持续时间内同时入站用户数为随机变量。可以参考通信网业务针对有限用户即时拒绝系统的分析, 假设入站信号服从泊松分布, 则帧长  $\Delta t$  时

\* 收稿日期: 2011-12-07

作者简介: 李井源(1982—), 男, 河北石家庄人, 博士生, E-mail: jingyuanlee.ljy@gmail.com

王飞雪(通信作者), 男, 教授, 博士, 博士生导师, E-mail: wangfeixue365@sina.com

间区间内,发生  $k$  次呼叫的概率为<sup>[4]</sup>

$$P_k(\Delta t) = \frac{(\lambda \Delta t)^k}{k!} e^{-\lambda \Delta t} \quad (1)$$

$\lambda$  为单位时间区间内的平均呼叫数,即呼叫率。对应的累积概率计算式为

$$P_k(\Delta t) = e^{-\lambda \Delta t} \sum_{i=0}^K \frac{(\lambda \Delta t)^i}{i!} \quad (2)$$

当累积概率接近 1 时,对应的用户数  $K$  就可以认为是入站信号帧长时间内同时入站用户数,由此得出接收信号可表示为

$$r = e^{j\theta_1} s_1(t - \tau_1) + w(t) \quad (3)$$

$$s_k(t - \tau_k) = \sqrt{2P_k} d_k a_k (1 - \tau_k) e^{jw_k t} \quad (4)$$

$k = 1, 2, \dots, K$

$$w(t) = \sum_{k=2}^K e^{j\theta_k} s_k(t - \tau_k) + n(t) \quad (5)$$

$w(t)$  是接收信号干扰项,为多址干扰和白噪声之和。

## 2 频谱分离下多址干扰影响分析

由于入站信号扩频码长较长且同时入站信号数量很多,入站信号多址干扰服从高斯分布<sup>[5-6]</sup>,由此得出多址干扰下系统等效载噪比计算公式为<sup>[7-8]</sup>

$$\left(\frac{C_s}{N_0}\right)_{eff} = \left(\frac{C_s}{N_0}\right) \left[ \eta^{-1} + \frac{C_I}{N_0} \frac{\kappa_{si}}{\eta^2} \right]^{-1} \quad (6)$$

其中:

$$\eta = \int_{-b}^b G_s(f) df \quad (7)$$

$b$  为接收机前端滤波器双边带宽, $\eta$  为经过带限滤波器的信号功率百分数。

$$\kappa_{si} = \int_{-b}^b G_i(f) G_s(f) df \quad (8)$$

为频谱隔离系数(Spectral Separation Coefficient, SSC),  $G_s(f)$  和  $G_i(f)$  分别为信号和多址干扰的归一化功率谱密度:

$$G_i(f) = G_s(f) = T_c \text{sinc}^2(\pi f T_c) \quad (9)$$

此处信号功率  $C_s = P_1$ , 多址干扰功率  $C_I$

$$= \sum_{k=2}^K P_k。$$

频谱分离情况下,计算多址干扰对等效载噪比影响时,需要分别计算同一扩频频谱内的干扰和不同扩频频谱间的干扰。同一扩频频谱内的多址干扰由式(8)得出,不同扩频频谱间的多址干扰只需要将式(8)更改为

$$\kappa'_{si} = \int_{-b}^b G_i(f - \beta) G_s(f) df \quad (10)$$

其中  $\beta$  为两个扩频频谱中心频率间隔。

根据式(8)和式(10),就能够得出各分离扩频频谱的接收信号多址干扰影响值,进而得到等效载噪比估计值。

## 3 频谱分离方案优化设计

分离为两个频谱的情况如图 1 所示,设转发器带宽为  $B = 16.5 \text{ MHz}$ ,扩频码速率为  $R_c$ ,则两个扩频频谱中心间隔为

$$\beta = B - 2R_c \quad (11)$$

随着扩频码速率  $R_c$  的增加  $\beta$  减小,两个扩频频谱重叠部分增多。

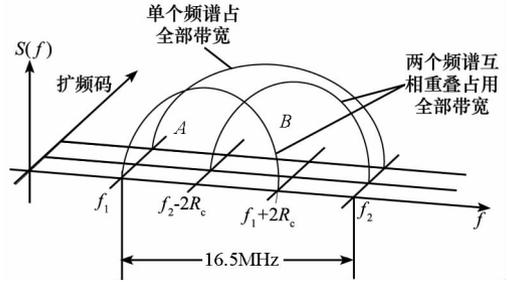


图 1 分离为两个频谱的示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the spectrum separated into two

从图 1 可以看出,分离为两个频谱 A 和 B 后,两个频谱相互之间的多址干扰一样,因此两个频谱的等效载噪比计算公式一致为

$$\begin{aligned} \left(\frac{C_s}{N_0}\right)_{eff}^A &= \left(\frac{C_s}{N_0}\right)_{eff}^B \\ &= \left(\frac{C_s}{N_0}\right) \left[ \eta^{-1} + \frac{C_I^A}{N_0} \frac{\kappa_{si}^A}{\eta^2} + \frac{C_I^{AB}}{N_0} \frac{\kappa_{si}^{AB}}{\eta^2} \right]^{-1} \end{aligned} \quad (12)$$

其中,  $\kappa_{si}^A$ 、 $\kappa_{si}^{AB}$  分别通过式(8)和式(10)求出,当各入站信号功率相同为  $C_s$  时有

$$\begin{aligned} C_I^A &= (K^A - 1)P \\ C_I^{AB} &= (K^B - 1)P \end{aligned}$$

$K^A$  和  $K^B$  分别为频谱 A 和频谱 B 同时入站用户数,易知此时  $K^A = K^B$ 。因此,当入站信号等效载噪比确定后,根据式(12)就可以得出此时系统允许的最大用户数。

按照现有 RDSS 系统接收信号解调门限 42.5 dBHz 计算,图 2 为分离为两个频谱情况下扩频码速率与两个频谱允许的同时入站用户总数的对应关系,图中横线等于 575,为单个扩频频谱独占 16.5 MHz 带宽时的最大入站用户数。图 2 表明,当两个频谱的扩频码速率为 3.8 MHz ~ 6.9 MHz 时,两个频谱同时入站的用户数都大于单个频谱独占全部带宽的情况,证明了通过扩频分离来增加系统入站容量的可行性。

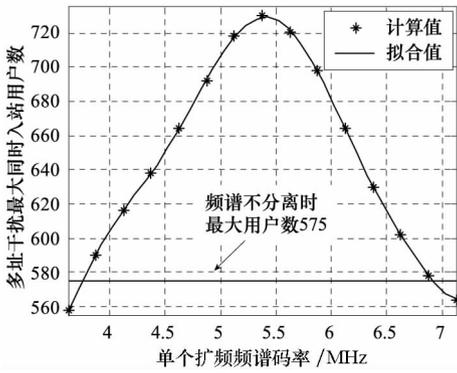


图2 分离为两个频谱情况下同时入站信号总数与单个频谱带宽的关系

Fig.2 The relationship between the total number of inbound signal and spectral bandwidth of a single spectrum in the case of spectrum separated into two

当扩频码速率为 5.4MHz 左右时,两个频谱同时入站总数达到最大值 730。此时近似为两个频谱互相重叠 50%。虽然扩频码速率在 3.8MHz ~ 6.9MHz 的范围内,频谱分离后入站容量都会增加,但扩频码速率越低,系统对入站信号的测距精度就越差。图 3 为按照入站信号信息速率 8Kbps、码跟踪环路带宽 50Hz、等效载噪比 42.5dBHz 时码跟踪精度与扩频码速率的关系。从图 3 中可以看出,达到 5ns ~ 10ns 的跟踪精度,扩频码速率还有降低的空间,因此考虑将转发器带宽分为三个频谱的情况。

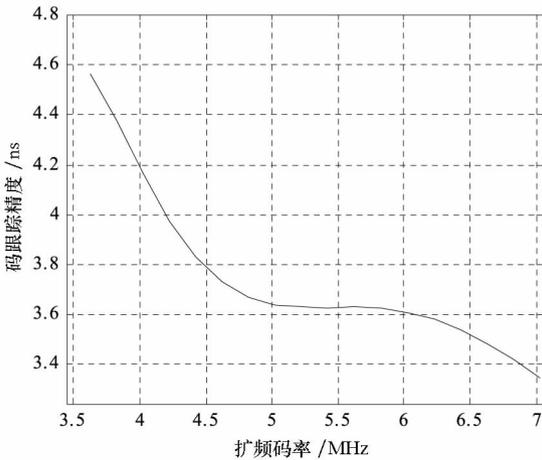


图3 码跟踪精度与扩频码速率的关系

Fig.3 The relationship between code tracking accuracy and spreading code rate

分离为三个频谱的情况如图 4 所示。从图 4 中可以看出,每个频谱都受到另外两个频谱的干扰,频谱 A 与频谱 C 中心频率间隔与式(11)相同,频谱 B 与频谱 A 和频谱 C 的中心频率间隔相同,为

$$\beta' = \frac{B}{2} - R_c \quad (13)$$

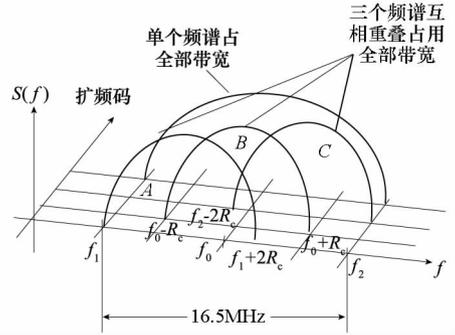


图4 分离为三个频谱的示意图

Fig.4 Schematic diagram of the spectrum separated into three

由此易知,频谱 A 受频谱 B 和 C 的干扰,与频谱 C 受频谱 A 和 B 的干扰相同,因此,频谱 A 和 C 的多址干扰下等效载噪比计算公式一样,与频谱 B 的不同。

三个频谱的等效载噪比计算公式分别为

$$\begin{aligned} \left(\frac{C_s}{N_0}\right)_{eff}^A &= \left(\frac{C_s}{N_0}\right)_{eff}^C \\ &= \left(\frac{C_s}{N_0}\right) \left[ \eta^{-1} + \frac{C_I^A}{N_0} \frac{\kappa_{si}^A}{\eta^2} + \frac{C_I^{AB}}{N_0} \frac{\kappa_{si}^{AB}}{\eta^2} + \frac{C_I^{AC}}{N_0} \frac{\kappa_{si}^{AC}}{\eta^2} \right]^{-1} \\ \left(\frac{C_s}{N_0}\right)_{eff}^B &= \left(\frac{C_s}{N_0}\right) \times \left[ \eta^{-1} + \frac{C_I^B}{N_0} \frac{\kappa_{si}^B}{\eta^2} + \frac{C_I^{AB}}{N_0} \frac{\kappa_{si}^{AB}}{\eta^2} + \frac{C_I^{BC}}{N_0} \frac{\kappa_{si}^{BC}}{\eta^2} \right]^{-1} \end{aligned} \quad (14)$$

同样假设各入站信号功率相同,按照现有 RDSS 系统接收信号解调门限 42.5dBHz 计算,图 5 分离为两个频谱情况下扩频码速率与三个频谱允许的同时入站用户总数的对应关系,图中横线等于 575,为单个扩频频谱独占 16.5MHz 带宽时的最大入站用户数。图 5 表明,当扩频码速率为 4MHz 左右时,三个频谱同时入站总数达到最大值 770,同样为三个频谱互相重叠近似为 50%。根据图 3 结果,扩频码速率 4MHz 时,码跟踪精度同样满足 5ns ~ 10ns 的要求。

上面的分析得到了单个频谱独占全部带宽、分为两个频谱和分为三个频谱情况下的同时入站最大用户数,分别为 575、730 和 770。将该值代入式(2),并假设累积概率值取为 99.9%,就可以得到同时入站用户数与入站容量的对应关系,如

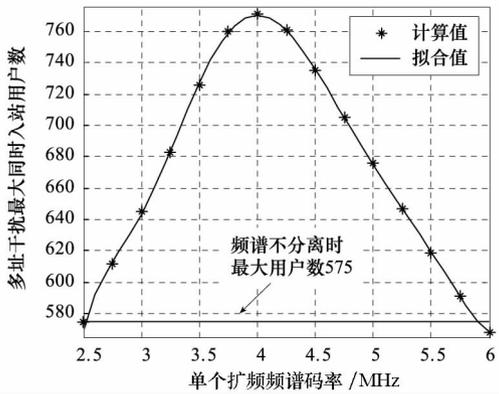


图5 分离为三个频谱情况下同时入站信号总数与单个频谱带宽的关系

Fig. 5 The relationship between the total number of inbound signal and spectral bandwidth of a single spectrum in the case of spectrum separated into three  
表 1 所示。可以看出,与单个频谱独占全部带宽相比,分离为两个频谱时,入站容量提高约 29%;分离为三个频谱时,入站容量提高约 37%。

表 1 平均帧长 140ms 下同时入站用户数与入站容量关系

Tab. 1 The relationship between number of inbound users and inbound capacity, average frame length 140ms

同时入站用户数	入站容量(次/s)
575	3600
730	4650
770	4920

## 4 结束语

针对卫星转发器带宽受限的情况,提出了采用频谱分离的方法合理利用现有转发器带宽,提高 RDSS 系统入站容量。通过分析和仿真得出频谱分离为两个和三个情况下,最优扩频码速率为使得分离的各频谱互相重叠一半。在保证入站信号测距精度  $< 5\text{ns}$  的前提下,分离为两个频谱时,系统入站容量可提高 29%,分离为三个频谱时系统入站容量可提高 37%,有效地解决了新一代 RDSS 系统大容量入站的问题。

转发器带宽受限下频谱分离的方法同样适用

于提高 CDMA 体制 GEO 卫星转发的站间时间同步网系统容量,比如北斗卫星导航系统站间同步/数传网络<sup>[3]</sup>、中国区域定位系统(CAPS)以及使用卫星双向时间频率传递(TWSTFT)的国际原子时比对系统<sup>[9]</sup>。

## 参考文献 (References)

- [1] 谭述森. 北斗卫星导航系统的发展与思考[J]. 宇航学报, 2008, 29(2): 391-396.  
TAN Shusen. Development and thought of Compass navigation satellite system[J]. Journal of Astronautics, 2008, 29(2): 391-396. (in Chinese)
- [2] Briskman R D. Radio determination satellite service[J]. Proceedings of The IEEE, 1990, 78(7): 1096-1106.
- [3] 谭述森. 卫星导航定位工程[M]. 2版. 北京: 国防工业出版社, 2010.  
TAN Shusen. The engineering of satellite navigation and positioning[M]. 2nd Ed. Beijing: National Defense Industry Press, 2010. (in Chinese)
- [4] 何选森. 随机过程与排队论[M], 长沙: 湖南大学出版社, 2010.  
HE Xuansen. Random process and queuing theory[M]. Changsha: Hunan University Press, 2010. (in Chinese)
- [5] James C J, Stüber G L. Effects of multiple-access interference on the noncoherent delay lock loop[J]. IEEE Transactions on Communications, 2000, 48(12): 2109-2119.
- [6] 李井源. 卫星 CDMA 通信系统多用户检测与信干比估计算法研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2006.  
LI Jingyuan. Study of the multiuser detection and signal to interference ratio estimation in satellite CDMA systems[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2006. (in Chinese)
- [7] Betz J W, Kolodziejcki K R. Generalized theory of code tracking with an early-late discriminator part II: noncoherent processing and numerical results[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2009, 45(4): 1551-1564.
- [8] Betz J W, Kolodziejcki K R. Generalized theory of code tracking with an early-late discriminator part I: lower bound and coherent processing[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2009, 45(4): 1538-1550.
- [9] Jiang Z, Petit G. TWSTFT data treatment for UTC time transfer[C]// 41st Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Meeting, 2009: 409-420.