

link

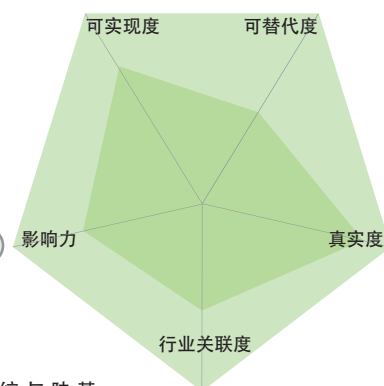
appraisalment

industry

刘 鹏 倪育德

中国民航大学电子信息与自动化学院

point



刘鹏 (1991-) 男, 河北石家庄人。中国民航大学电子信息与自动化学院硕士研究生, 主要研究方向广播式自动相关监视技术; 倪育德 (1963-) 男, 江西省鹰潭市。中国民航大学教授, 硕士生导师, 主要从事卫星导航, 广播式自动相关监视技术研究。

基金资助: 名称: 中央高校基本科研业务费, 编号: ZXH2011C013

本文针对星基 ADS-B 系统与陆基 ADS-B 传输环境不同, 需要选择合适的链路和分析传输过程中的问题, 提出对星基 ADS-B 接收机灵敏度和地面站天线类型及其参数进行预算和分析的观点。在星基 ADS-B 系统研究领域起到能够为我国星基 ADS-B 系统研究提供有效的理论支持作用。

星基 ADS-B 的链路预算

根据卫星通信系统链路功率计算的关键环节与预算步骤, 结合广播式自动相关监视 (ADS-B) 系统最低运行性能标准, 建立了星基 ADS-B 系统链路功率预算模型。通过星基 ADS-B 系统的链路损耗分析, 由上行链路预算能够得到卫星高度下卫星接收机的灵敏度范围, 下行链路预算可以获取地面站天线的增益参数, 对此选择了合适的地面站天线。

广播式自动相关监视 (ADS-B) 是目前民用航空采用空地、空空数据通信完成空中交通监视和信息传递的一种航行新技术。该技术将卫星导航、数据通信、机载设备以及地面设备等先进技术相结合, 为飞行提供更加安全、高效的监视手段。2014 年 3 月 8 日发生的 MH370 失联事件, 暴露了当前包括 ADS-B 在内的陆基监视系统还不能满足航空监视全球化和全程无缝监视覆盖的要求, 因此利用星基 ADS-B 系统对航空器进行监视将是一个很好的选择。星基 ADS-B 系统以空间卫星为平台, 可实现对绝大多数飞机从起飞到降落的全程监视, 同时还克服了 ADS-B 系统和陆基雷达由于视距传输和遮挡带来的监视距离短以及低空盲区等问题。

国际民航组织 (ICAO) 已经制定了有关 ADS-B 的“标准与建议措施 (SARPs)”, 然而, 用于卫星接收 ADS-B 信号以及地面接收卫星转发 ADS-B 信号的相关性能标准仍未制定。由于星基 ADS-B 系统与陆基 ADS-B 传输环境不同, 因此选择合适的链路和分析传输过程中的问题, 对于星基 ADS-B 的研究发展具有重要的意义。本文在卫星通信链路预算的基础上, 结合现有航空无线电技术委员会 (RTCA) DO-260B《广播式自动相关监视 (ADS-B) 最低航空系统性能标准》, 对星基 ADS-B 接收机灵敏度和地面站天线类型及其参数进行预算和分析。

星基 ADS-B 系统概述

星基 ADS-B 工作过程

星基 ADS-B 发射 (OUT) 系统主要由机载 ADS-B

B 发射机、卫星转发器和 ADS-B 地面站组成, 其工作过程如图 1 所示。机载 ADS-B 发射机将全球导航卫星系统 (GNSS) 导出的飞机位置、速度以及其它相关数据, 以规定的报文格式上传给载有 ADS-B 转发器的低轨卫星, 再通过下行链路将 ADS-B 报文传给地面接收站。

星基 ADS-B 系统传播距离

星基 ADS-B 系统的最大优势是覆盖范围广, 理论上信号最远传播距离 r 可由图 2 模型获得, 其中图 2 (a) 和图 2 (b) 分别为天线仰角 0° 和 5° 时低轨卫星覆盖角示意图。

低轨卫星覆盖域为球冠表面, 按锥面与地球相切计算如图 2 (a), 可得覆盖角 γ 为:

$$\gamma = \cos^{-1} \left(\frac{R}{R+H} \right) \quad (1)$$

式中, R 为地球半径, H 为卫星在轨高度。

当天线仰角为 α 时, 由图 2 (b) 可得到覆盖角 β 满足:

$$\cos \alpha - \tan \alpha \times \sin \beta = \frac{R}{R+H} \quad (2)$$

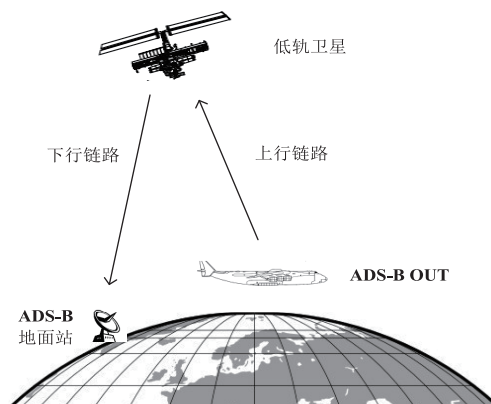


图 1 星基 ADS-B OUT 系统工作过程

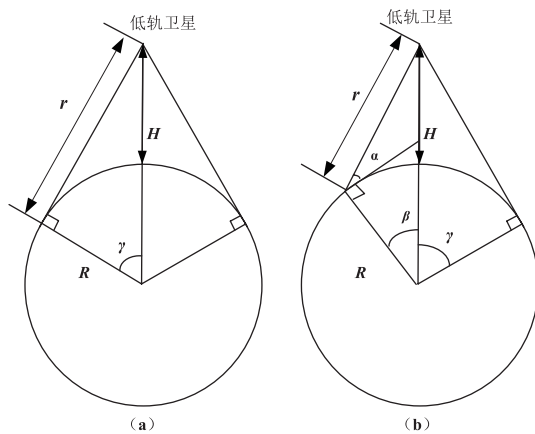


图2 星基 ADS-B 低轨卫星覆盖角示意图

对于星基 ADS-B 系统,其卫星在轨高度以铱星为例 $H=780\text{km}$,地球半径 $R=6371\text{km}$,不考虑天线仰角时,得到覆盖角为 27° ,理论最远传播距离 r 为 3248km ;若天线仰角为 5° 则覆盖角为 22.4° ,最远传播距离为 2740km 。

星基 ADS-B 系统利用卫星覆盖范围广的特点,实现对覆盖区域内民航飞机的有效监视和跟踪。若通过由数颗微纳卫星构成低轨卫星组网,则可实现对全球空域的无缝覆盖。

星基 ADS-B 系统的链路损耗

星基 ADS-B (OUT) 系统共有两个传输链路,即从机载 ADS-B 发射机到低轨卫星的上行链路,以及从低轨卫星到 ADS-B 地面站的下行链路。下行链路与上行链路的损耗分析过程基本相同,以上行链路分析为例,机载 ADS-B 发射机天线辐射的信号需要穿过大气层,通过广阔的空间被卫星接收机接收,这个过程信号会受到很多因素的影响,主要包括自由空间损耗、大气吸收损耗、雨雾云吸收损耗以及收发天线损耗。

自由空间损耗

从机载 ADS-B 发射机到低轨卫星的通信距离远达几百到几千公里,造成损耗很大,因此自由空间损耗是分析星基 ADS-B 上行链路性能的一个主要因素。电磁波的自由空间损耗为:

$$L_r = \left(\frac{4\pi r}{\lambda} \right)^2 \quad (3)$$

其中, L_r 为传播距离为 r 时的损耗, λ 为信号波长。

当以工作频率和分贝数表示时,式(3)可以改写为:

$$L_{r[\text{dB}]} = 32.44 + 20 \log r_{(\text{km})} + 20 \log f_{(\text{MHz})} \quad (4)$$

大气吸收损耗

大气吸收衰减的大小与工作频率、天线仰角以及气候条件有密切关系,图3给出了在晴朗条件下,大气中自由电子、离子、氧气和水汽分子对电磁波吸收衰减与频率的关系。

星基 ADS-B 系统采用 1090ES 数据链,其工作频率为 1090MHz。从图3中可以看出,在 1090MHz 附近只有仰角为 0° 时的水蒸气分子吸收谐振有约 2dB 的衰减,其他衰减均小于 0.1dB。

雨雾云吸收损耗

对于高可用度的星基 ADS-B 系统而言,雨衰是影响系统上行信号链路质量和系统运行稳定性的重要因素。统计

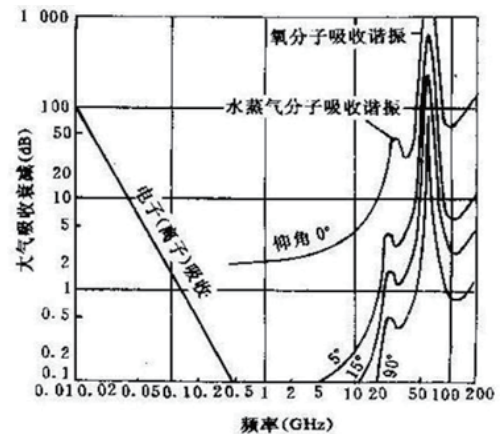


图3 大气中自由电子、离子、氧气水汽分子对电磁波吸收衰减

雨衰模型一般采用国际电信联盟无线电通信组 (ITU-R) 提供的雨衰模型,它来源于储存在 ITU-R 数据库里的长期测试的雨衰结果,该模型对于 L 波段的卫星信号同样有效。

雨衰模型为:

$$A = k \times R^\alpha \times L \quad (5)$$

式中, A 为雨衰值 (dB), R 为降雨量 (mm/h), L 为雨层对电磁波作用的等效路径长度 (km), k 、 α 为电磁参数,是依赖于电磁波频率和极化方式的常数。

天线损耗

在星基 ADS-B 报文发射和接收过程中,发射机和发射天线以及接收机天线和接收机相连的部分均会产生馈线损耗、节头损耗和透镜损耗,这些损耗大小一般为几分贝。

链路功率预算模型

下面将结合 A3 类机载 ADS-B 接收机的接收性能,给出一个基于 1090ES ADS-B 链路功率预算模型。该模型可以模拟信号传播距离对接收 ADS-B 报文的影响,从而得到符合要求的星基 ADS-B 接收机灵敏度。由于上行链路与下行链路功率预算的分析过程基本相同,故以上行链路为例进行分析。

一般将发射功率与发射天线增益的乘积用等效全向辐射功率 (EIRP) 来表示,即:

$$EIRP_T = P_T \times G_T \quad (6)$$

$$EIRP_{T[\text{dB}]} = 10 \log P_T + 10 \log G_T \quad (7)$$

式中, P_T 为机载 ADS-B 发射机的发射功率, G_T 为机载发射天线的增益。

上行链路损耗分两部分考虑,除自由空间的传输损耗 L_r 外,还有大气吸收损耗、雨雾云吸收损耗以及发射和接收天线损耗,为了简化,令这部分损耗为 L_s 。

上行链路预算中,卫星接收功率的分贝形式为:

$$S_{[\text{dB}]} = EIRP_T + G_R - L_r - L_s \quad (8)$$

式中, G_R 为卫星接收天线增益。

自由空间损耗可以表示为:

$$L_r = L_{1\text{km}} - 20 \times \log(r) \quad (9)$$

其中, $L_{1\text{km}} = -93.19\text{dB}$,是传播距离 $r=1\text{km}$ 时, 1090MHz ADS-B 信号在自由空间的路径损耗。

星基 ADS-B 系统接收功率 S 与传播距离 r 之间的关系为:

$$S - S_{1_km} = L_r - L_{1_km} = 20 \times \log(r) \quad (10)$$

或:

$$r = 10^{-(S - S_{1_km})/20} = e^{-(S - S_{1_km})/20} \quad (11)$$

其中, S_{1_km} 是传播距离 $r=1\text{km}$ 时接收到 ADS-B 信号的功率。

在无干扰情况下, ADS-B 信号探测解码率 d 与星基 ADS-B 接收机接收功率 S 的关系可以为:

$$d = 1 - e^{-l(S - S_0)/20} = 1 - e^{-l(S - S_0)/20} \quad S \geq S_0 \quad (12)$$

其中, d 为信号探测解码率, S_0 是恰好探测不到信号 ($d=0$) 时接收的信号功率, l 为常数。

将式 (10) 代入式 (12) 可以得到, 在无干扰情况下, ADS-B 信号探测解码率 d 与传播距离 r 的关系, 即:

$$d = 1 - \left(r \times e^{-(S_{1_km} - S_0)/20} \right)^l = 1 - \left(r \times e^{-k(S_{1_km} - S_0)/20} \right)^l \quad (13)$$

则:

$$d = 1 - (r/r_0)^l \quad r \leq r_0 \quad (14)$$

其中, r_0 是恰好检测不到信号 ($d=0$) 时的传播距离。

RTCA DO-260B 规定的 ADS-B 接收机的两个接收条件为:

1) 如果, 则;

2) 对于 A3 类 ADS-B 接收机, 如果, 则。

利用这两个条件, 就可以根据不同的接收机最小触发电平 SMTL 值, 从式 (12) 至式 (14) 中解出相应的 S_0 、 l 、 r_0 , 从而可以确定信号探测解码率和传播距离的关系。

链路预算实例

下面在链路预算模型的基础上, 给出了基于铱星 (离地面高度为 780km) 星基 ADS-B 系统链路的计算实例。不同航空电子类别对 ADS-B 系统发射机功率和接收机灵敏度的要求不同, 这些要求总结在表 1 中。接收机灵敏度可以理解为最低触发电平 (MTL), 对于 A3 类接收机, 它是指输入信号频率在 1090MHz 时, 没有干扰和重叠的情况下, 当输入信号的射频功率电平为 -84dBm 时, 接收机探测解码率应不小于 90%; 而当输入信号电平为 -87dBm 时, 接收机探测解码率应不小于 15%。

表 1 ADS-B 发射机和接收机需求

航空设备类别	发射功率 (dBm)	接收机最小触发电平 (dBm)
A0	48.5 - 57	-72
A1	51 - 57	-79
A2	51 - 57	-79
A3	53 - 57	MTL (90%) = -84
		MTL (15%) = -87

当机载发射机采用 A3 类 ADS-B 设备时, 由表 1 可知最小发射功率为 53dBm。卫星天线参考德国为星基 ADS-B 研制的多波束天线, 其中心增益大于 11dBi, 覆盖边缘大于 8dBi。

降雨损耗以天津为例, 其纬度为 39.130, 海拔为 3.3m, 降雨量设为 60mm/h。整个链路过程分配了 0.5dB 冗余量。表 2 是信号发射频率在 1090MHz 时, 星基 ADS-B 系统的上行链路预算。

表 2 星基 ADS-B 上行链路预算

探测距离 (km)	780	2740	3248
机载发射功率	53dBm (200W, A3 类)		
发射天线增益	3dB		
发射天线损耗	3dB		
自由空间路径损耗	151.03dB	161.95dB	163.42dB
大气吸收损耗	0.5dB	0.5dB	2.5dB
降雨损耗	0.01 dB	0.02dB	0.03dB
其他损耗	0.5dB	0.5dB	0.5dB
卫星接收天线损耗	3dB	3dB	3dB
卫星接收天线增益	11dB	8dB	8dB
所需卫星接收机灵敏度 (信号探测解码率 95%)	-91.87dBm	-105.80dBm	-109.28dBm

从表 2 可以看出, 在满足信号探测解码率 95% 的情况下, 所需卫星接收机灵敏度范围从 -91.87dBm 到 -109.28dBm。

在下行链路的预算中, 卫星转发器功率为 10W, 发射天线增益为 10dB, 接收机灵敏度设为 -90dBm (如四川信能科技发展有限公司研制的 XN-2600 接收机灵敏度为 -90dBm), 同样留有 0.5dB 的冗余量作为其他损耗。信号转发频率在 1090MHz 时, 下行链路预算如表 3 所示。

表 3 星基 ADS-B 下行链路预算

探测距离 (km)	780	2740	3248
卫星转发器功率	40dBm (10W)		
发射天线增益	10dB		
发射天线损耗	3dB	3dB	3dB
自由空间路径损耗	151.03dB	161.95dB	163.42dB
大气吸收损耗	0.5dB	0.5dB	2.5dB
降雨损耗	0.01 dB	0.02dB	0.03dB
其他损耗	0.5dB	0.5dB	0.5dB
地面站接收天线损耗	3dB		
地面站接收机灵敏度	-90dBm		
地面站接收天线增益 (信号探测解码率 95%)	18.87dBi	29.8dBi	33.28dBi

根据下行链路预算表 3 可知, 为了使卫星覆盖范围内信号检测率达到 95%, 需要地面站接收天线增益范围从 18.87dBi 到 33.28dBi。而现有的地面 ADS-B 接收天线如九州空管的增益只有 12dBi, 因此当前的天线不能满足星基 ADS-B 的接收需求。

ADS-B 地面站天线选择

现有的 ADS-B 地面站天线为直立全向天线, 其采用交叉馈电偶极子的辐射单元, 使用小型化馈电网络对并联馈电辐射单元馈以特定的幅度和相位, 天线水平面为全向辐射, 以满足 ADS-B 水平全向覆盖需求, 垂直面则需通过调节每个辐射单元的幅度和相位使方向图波束指向上翘约 3dB 波束宽度的一半, 这样可以在满足最大作用距离需求时, 尽量减少多径反射带来的影响。

为了简化 ADS-B 全向天线增益计算, 假设它是电流分布处处等幅、处处等相的理想天线。若将它看成由 n 段组成, 每段长为 1, 总长为 L 时, 全向天线增益可以表示为:

$$G = \frac{2L/\lambda}{1 - 0.4 \left(\frac{L}{\lambda} \right)^2} \quad (15)$$

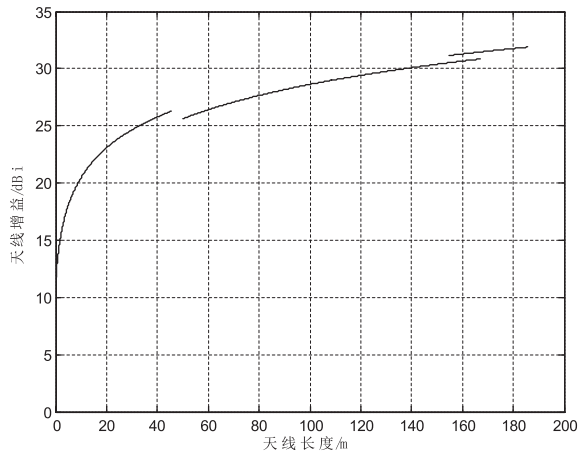


图4 1090MHz 下天线增益与天线长度关系

$$G \approx 2L/\lambda + 0.4, (L/\lambda \text{ 稍大时}) \quad (16)$$

$$G \approx 2L/\lambda, \left(\frac{L}{\lambda} \geq 3\right) \quad (17)$$

式中, G 为全向天线增益, λ 为 1090ES ADS-B 信号波长。

根据式 (17), 能够得到在 1090MHz 下天线增益与天线长度关系如图 4 所示。

由于多径反射对天线仰角为 0° 时影响较大, 故最远传播距离为 2740km。根据表 3 可得, 信号探测解码率在 95% 时, 需要地面站接收天线增益范围从 18.87dBi 到 29.8dBi。由图 4 可以看到, 满足需求时天线长度范围从 8.42m 到 131.4m。上百 m 的直立天线无论是技术难度, 还是成本考虑都是难以实现的。

而大多数通信卫星地面接收站采用抛物面天线, 抛物面天线口径越大, 接收信号越强。

抛物面天线增益可以表示为:

$$G = D\eta = \frac{4\pi}{\lambda^2} S v \eta = \frac{4\pi}{\lambda^2} S g \quad (18)$$

其中, G 为抛物面天线增益, D 为抛物面天线的方向系数, 为天线效率, λ 是接收信号的波长, S 为口径面积, v 为天线面积利用系数, η 口径截获效率, g 为增益因子。

天线口径面积:

$$S = \pi R^2 = 4\pi f^2 \tan^2\left(\frac{\varphi_0}{2}\right) \quad (19)$$

其中, R 为抛物面天线半径, f 为天线的焦距, φ_0 为天线最大半张角。

增益因子:

$$g = v\eta \quad (20)$$

天线面积利用系数:

$$v = \frac{\left| \iint_S E_s dS \right|^2}{S \iint_S |E|^2 dS} = 2 \cot^2 \frac{\varphi_0}{2} \frac{\int_0^{\varphi_0} F^2(\varphi) \tan \frac{\varphi}{2} d\varphi}{\int_0^{\varphi_0} F^2(\varphi) \tan \frac{\varphi}{2} d\varphi} \quad (21)$$

口径截获效率:

$$\eta = \frac{P_{rs}}{P_r} = \frac{\int_0^{\varphi_0} F^2(\varphi) \tan \varphi d\varphi}{\int_0^{\varphi_0} F^2(\varphi) \tan \varphi d\varphi} \quad (22)$$

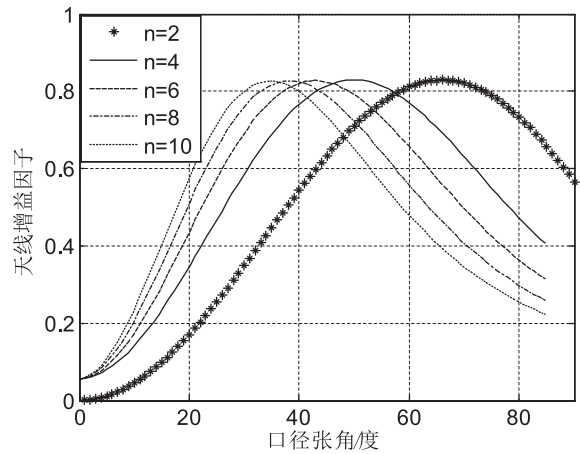


图5 抛物面天线增益因子与口径张角关系

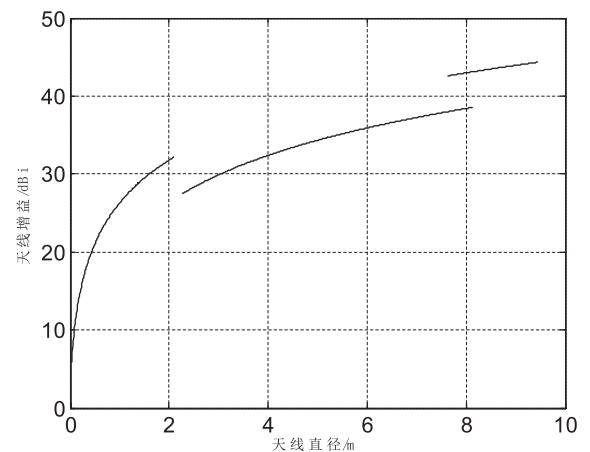


图6 1090MHz 下抛物面天线增益与天线直径关系

抛物面天线的口径焦距比 $n=R/f$, 当 n 分别取 2、4、6、8、10 时, 可以得到图 5 所示抛物面天线增益因子 g 与抛物面口径张角 φ_0 的关系。

从图 5 可以看出, 存在着最佳口径张角, 使得抛物面天线增益因子取得最大值。在不同口径焦距比下, $n=2$ 时的增益因子值最大, 此时口径张角为 66° , 天线增益因子约为 0.83。

图 6 给出了天线增益因子在 0.83 时, 信号频率在 1090MHz 时抛物面天线增益与天线直径的关系。

同样考虑最远传播距离为 2740km 时, 从图 6 可以看出, 当地面站接收天线增益范围从 18.87dBi 到 29.8dBi 时, 只需要抛物面天线直径范围从 0.85m 到 2.97m。从技术难度上来看, 抛物面天线接收卫星信号已经十分成熟, 是具有可行性的; 成本上由于口径不大, 也应当优于几十 m 的直立天线。

结束语

本文通过建立星基 ADS-B 系统链路预算模型, 以铱星所在高度为实例, 计算得出卫星接收机的灵敏度范围和地面站天线的基本参数。进一步分析可以看出现有的机载 ADS-B 转发器不能直接安装到低轨卫星上, 地面站的天线同样不能满足要求, 并给出了抛物面天线替代直立天线后所需的参数。该模型同样适用于不同高度低轨卫星下星基 ADS-B 系统链路预算, 能够为我国星基 ADS-B 系统研究提供有效的辅助作用。