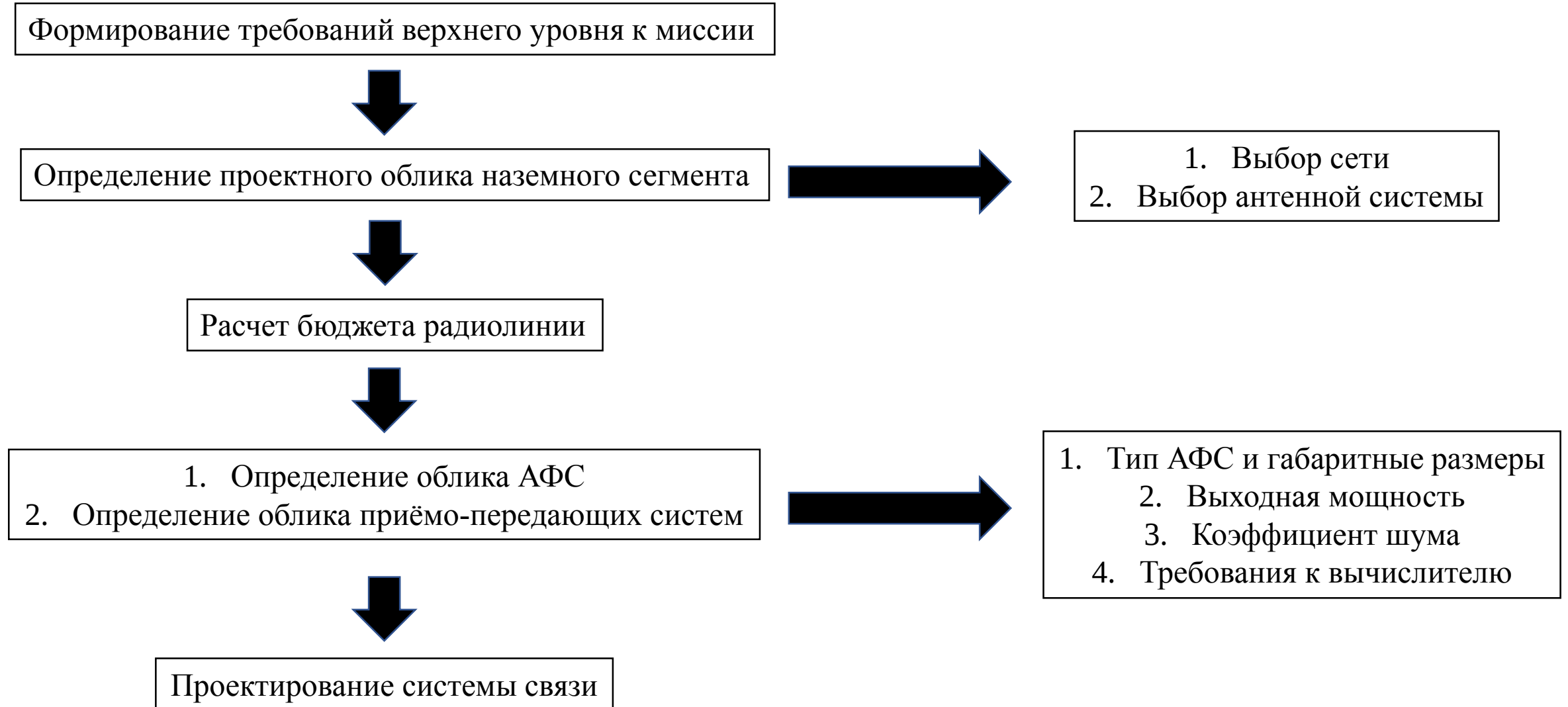


Принципы организации связи с межпланетными аппаратами

Докладчик: Малахов Роман Юрьевич,
к.т.н, ведущий инженер ООО «СПУТНИК»

Системное проектирование межпланетной связи



Основы электродинамики

Таблица 1.1

№	Уравнения Максвелла (в интегральной форме)	Краткое физическое истолкование
1	$\oint_l H dl = \int_S \delta dS$	Изменяющееся во времени электрическое поле (его токи: проводимости, переноса и смещения) возбуждают вихревое магнитное поле. Суммарная плотность токов: $\delta = \delta_{np} + \delta_{пер} + \delta_{см}$
2	$\oint_l E dl = - \frac{\partial \Phi}{\partial t}$	Изменяющееся во времени магнитное поле возбуждает вихревое электрическое поле.
3	$\oint_S D dS = q$	Статическое электрическое поле возбуждается неизменными во времени зарядами. Источники электрического поля расположены в местах нахождения электрических зарядов.
4	$\oint_S B dS = 0$	Магнитное поле всегда является вихревым, а его силовые линии всегда замкнуты. Магнитное поле не имеет источников силовых линий.

Теорема о циркуляции
магнитного поля

Закон индукции Фарадея

Закон Гаусса

Закон Гаусса
для магнитного поля

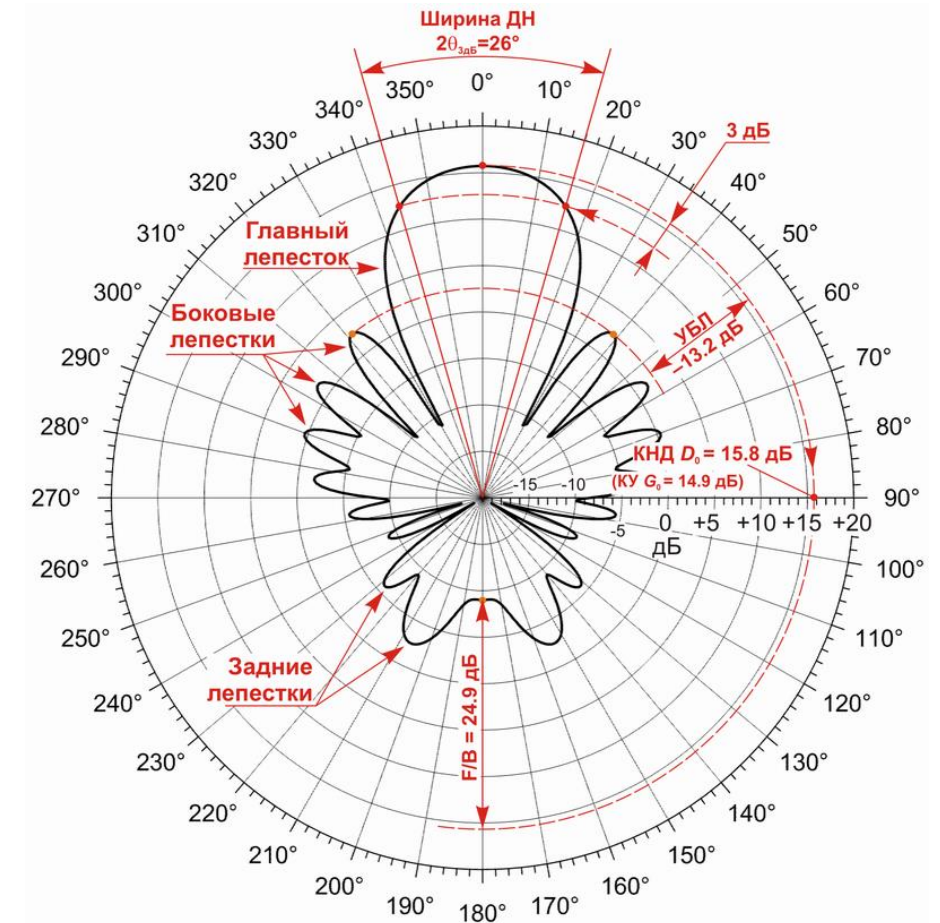
Антенны – основные термины и определения

Коэффициент усиления (КУ) антенны — отношение мощности на входе эталонной ненаправленной антенны к мощности, подводимой ко входу рассматриваемой антенны, при условии, что обе антенны создают в данном направлении на одинаковом расстоянии равные значения напряженности поля или такую же плотности потока мощности.

Диаграмма направленности – зависимость модуля комплексной амплитуды вектора напряженности электрической компоненты электромагнитного поля, создаваемого антенной в дальней зоне от угловых координат точки наблюдения в горизонтальной и вертикальной плоскости.

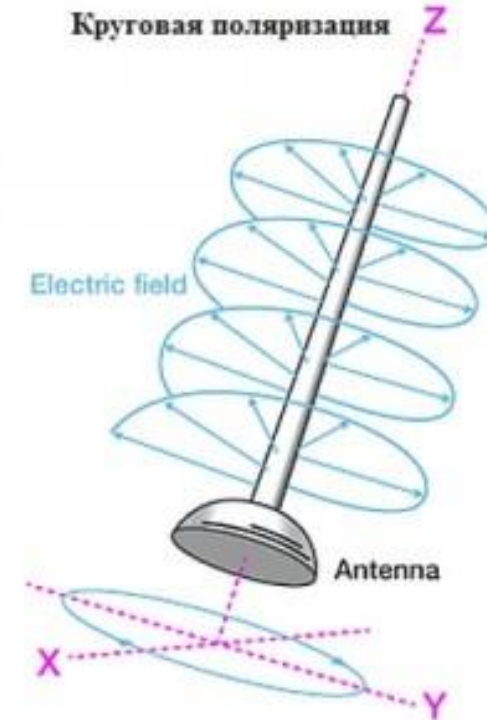
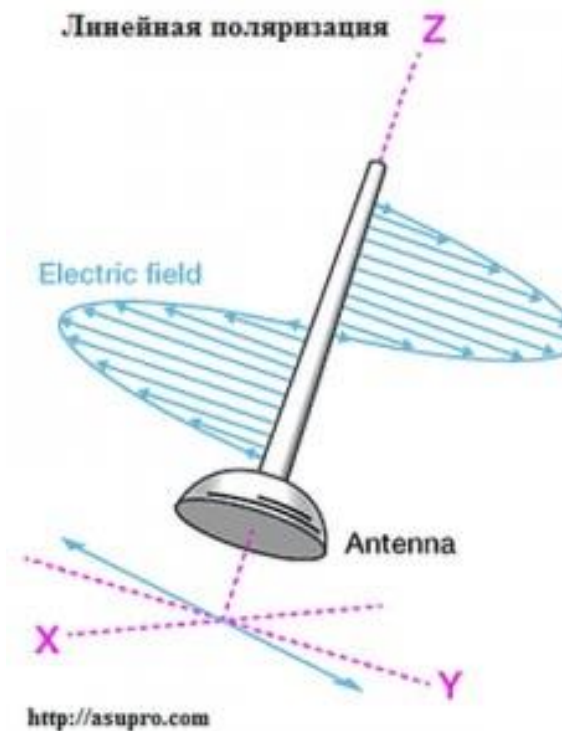
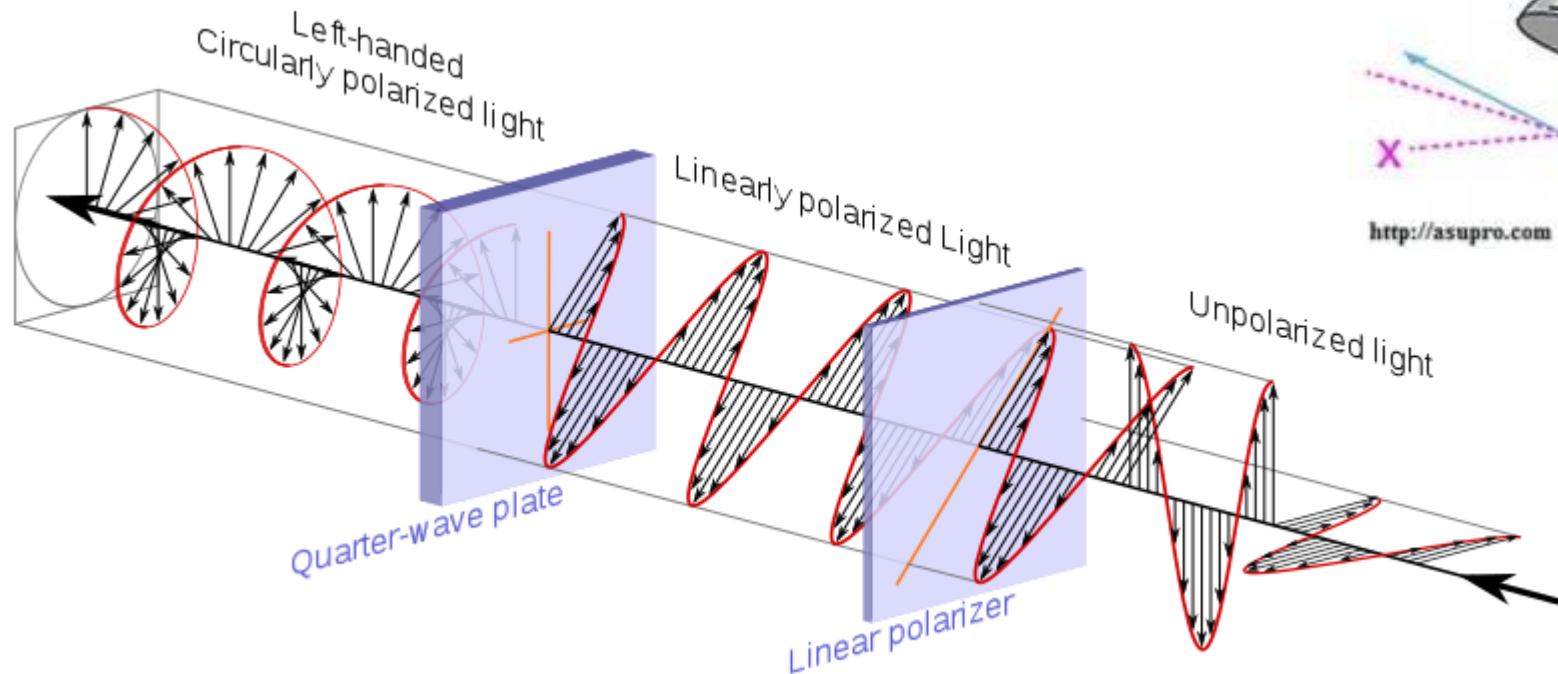
$$G = \frac{4\pi S_A}{\lambda^2}, S_A = \frac{\pi d_A^2}{4}, \Theta_A = \frac{\lambda}{d_A},$$

где S_A , d_A — Эффективная площадь и протяженность апертуры антенны



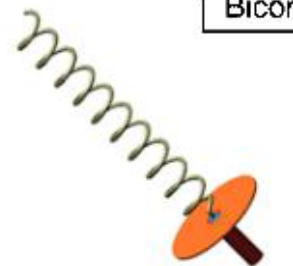
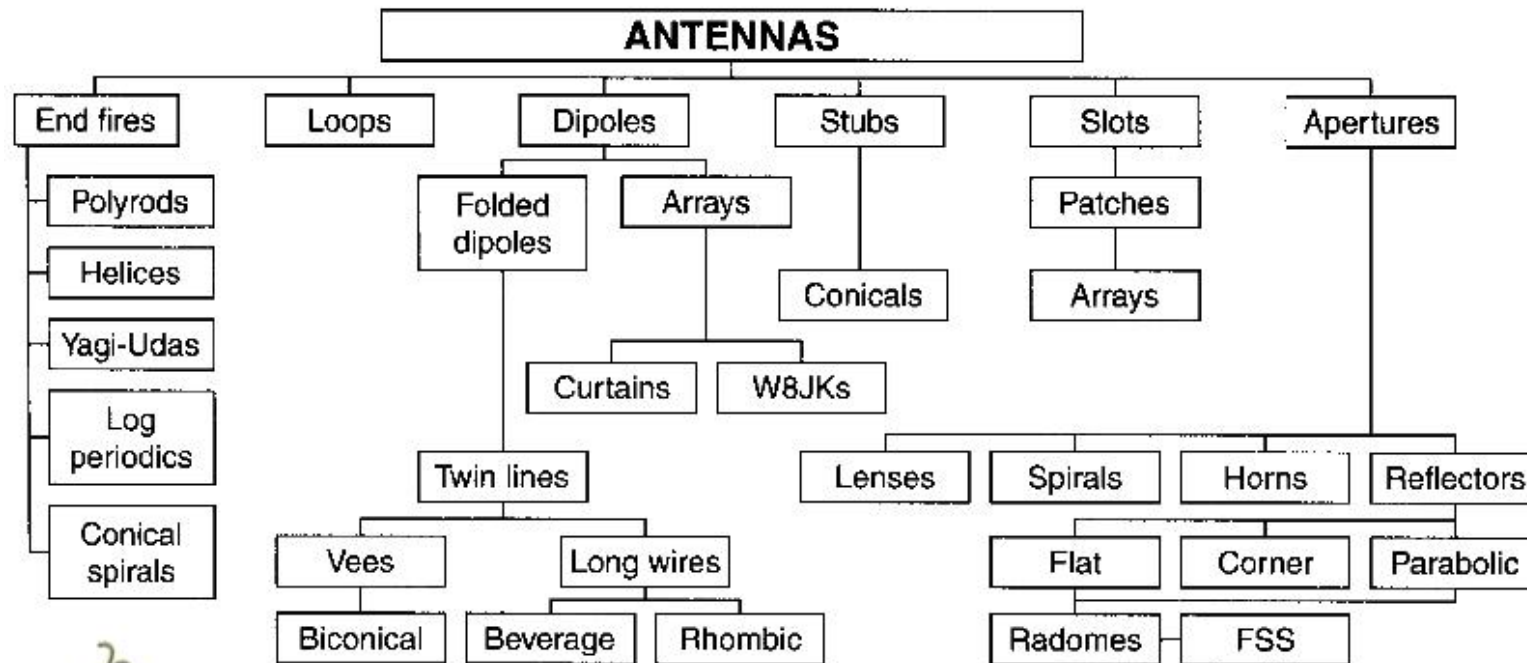
Антенны – основные термины и определения

Поляризация волн — характеристика поперечных волн, описывающая поведение вектора колеблющейся величины в плоскости, перпендикулярной направлению распространения волны

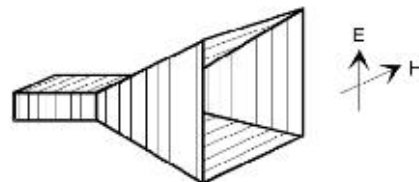


Антенны – классификация

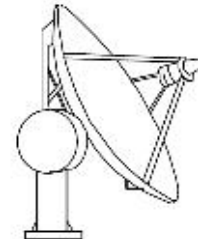
Antenna types



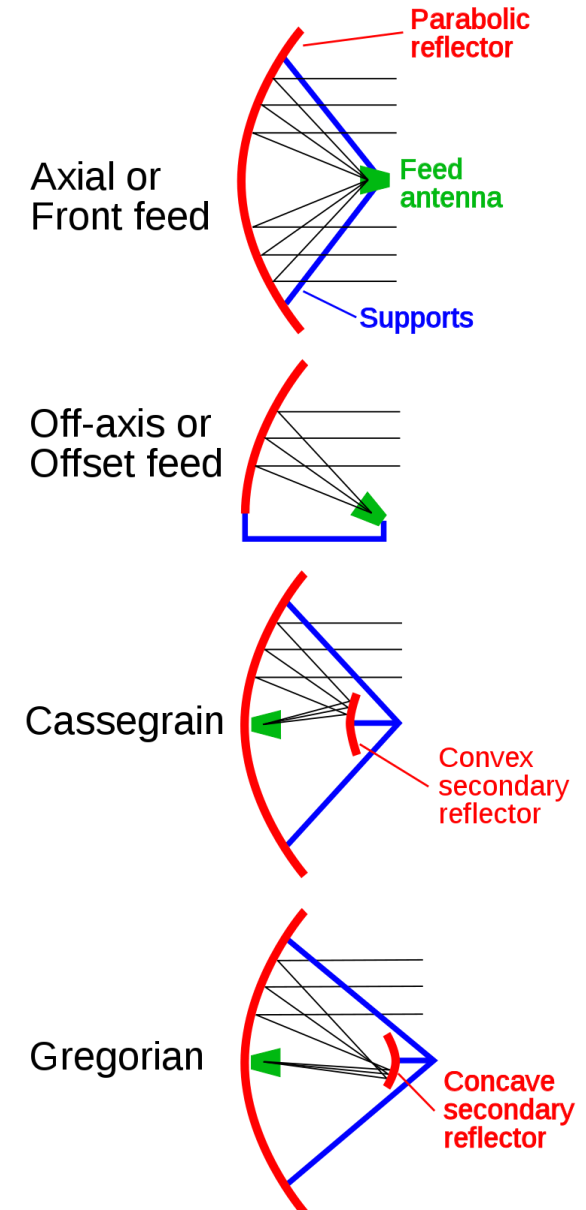
Helical antenna



Horn antenna



Parabolic reflector antenna



Антенны – межпланетные миссии

Table 1-1. Spacecraft lifetime estimates in calendar years.

	Voyager 1	Voyager 2
Electrical power	2023	2023
Telemetry link capability		
7200 bps, 70-/34-m HEF ^a array	1994	1998
1400 bps, 70-m antenna	2007	2011
600 bps, 70-m antenna	2026	2030
600 bps, 34-m HEF antenna	2003	2007
160 bps, 34-m HEF antenna	2024	2029
40 bps, 34-m HEF antenna	2050	2057
Hydrazine for attitude control	2040	2048

^a High efficiency.

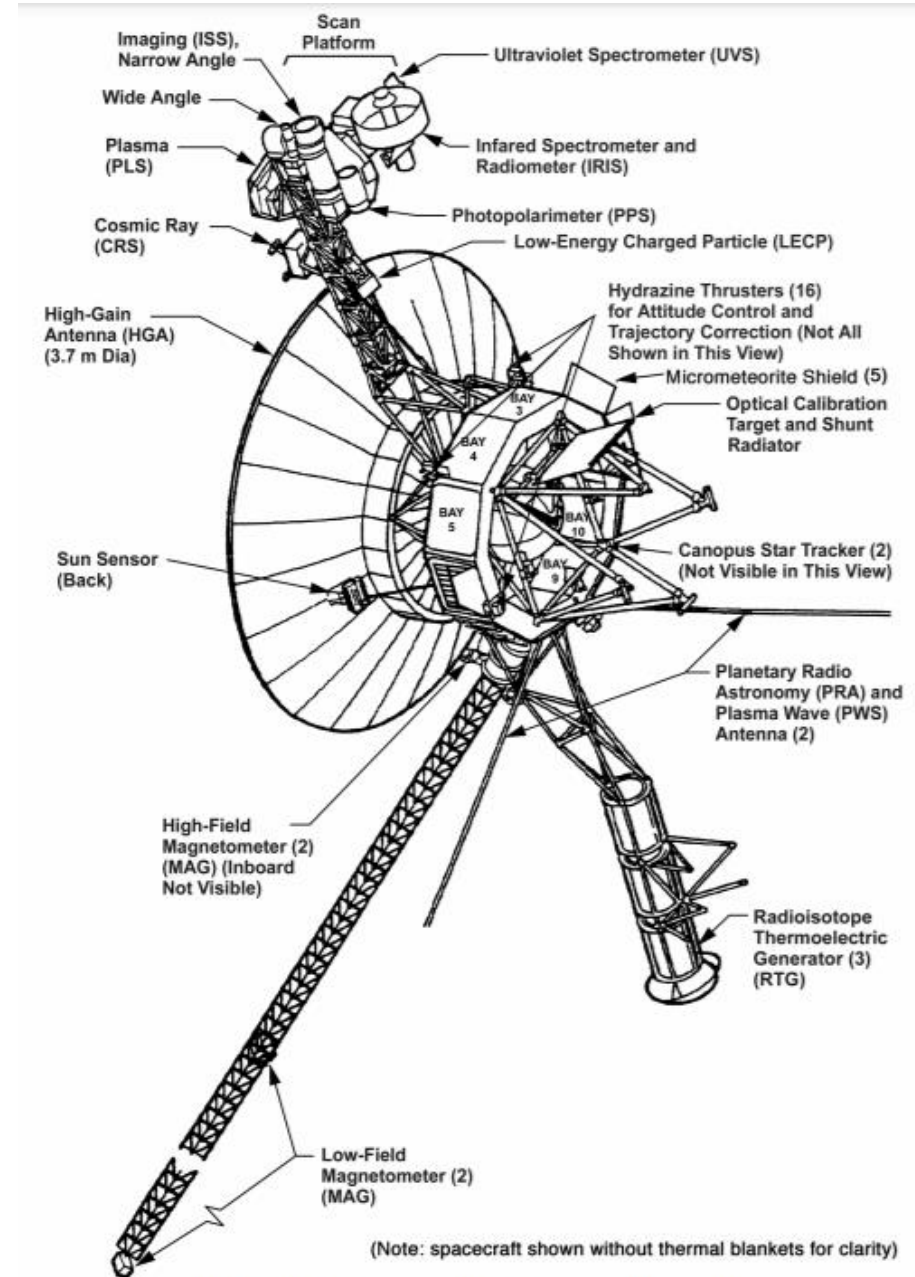


Fig. 1-2. Voyager spacecraft and science instruments.

Антенны – межпланетные миссии (Dawn – Веста, Церера)

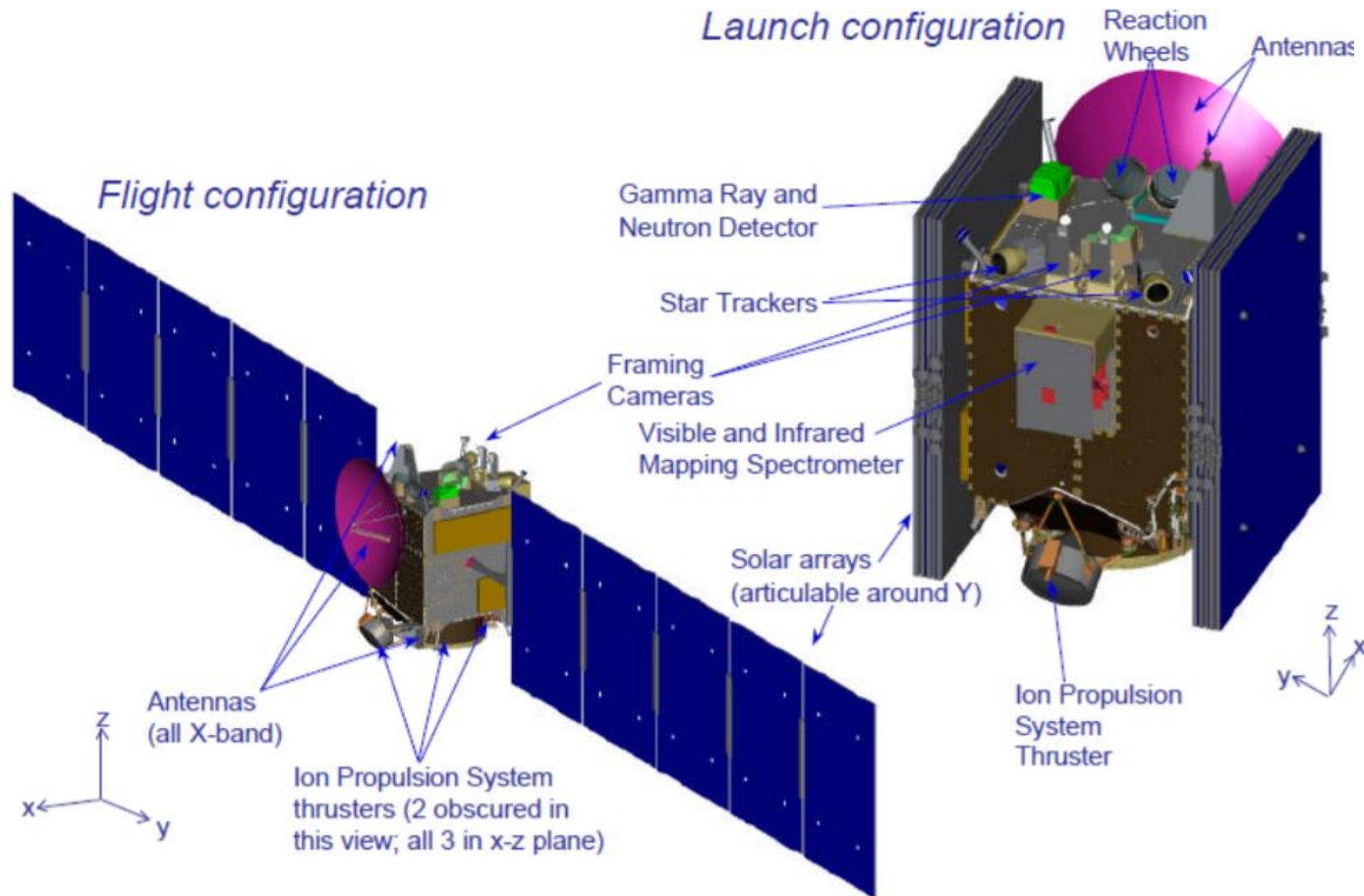


Table 1-4. Major telecom subsystem uplink and downlink parameters.

Parameter	Uplink	Downlink
Channel	29	29
Carrier Frequency (MHz)	7179.650464	8435.370372
Carrier Modulation	PCM (NRZ-L)/BPSK/PM	PCM (NRZ-L)/BPSK/PM
Polarization	RCP	RCP
Baseband Encoding	NRZ-L	NRZ-L
Subcarrier Type	Sinewave	Squarewave
Subcarrier Freq. (kHz)	16	25 (for rates > 2 kbps, data modulated directly on carrier)
Subcarrier Modulation	BPSK	BPSK
Coding	BCH (Bose-Chaudhari-Hocquenghem)	Turbo-coding (Rate 1/6), 3568 bit code block
Data Rate (bps)	7.8125, 15.625, 31.25, 62.5, 125, 250, 500, 1000, 2000	10, 40, 998, 199 5.99, 41250.46, 61875.69, 123751.39

Антенны – межпланетные миссии (Dawn – Веста, Церера)

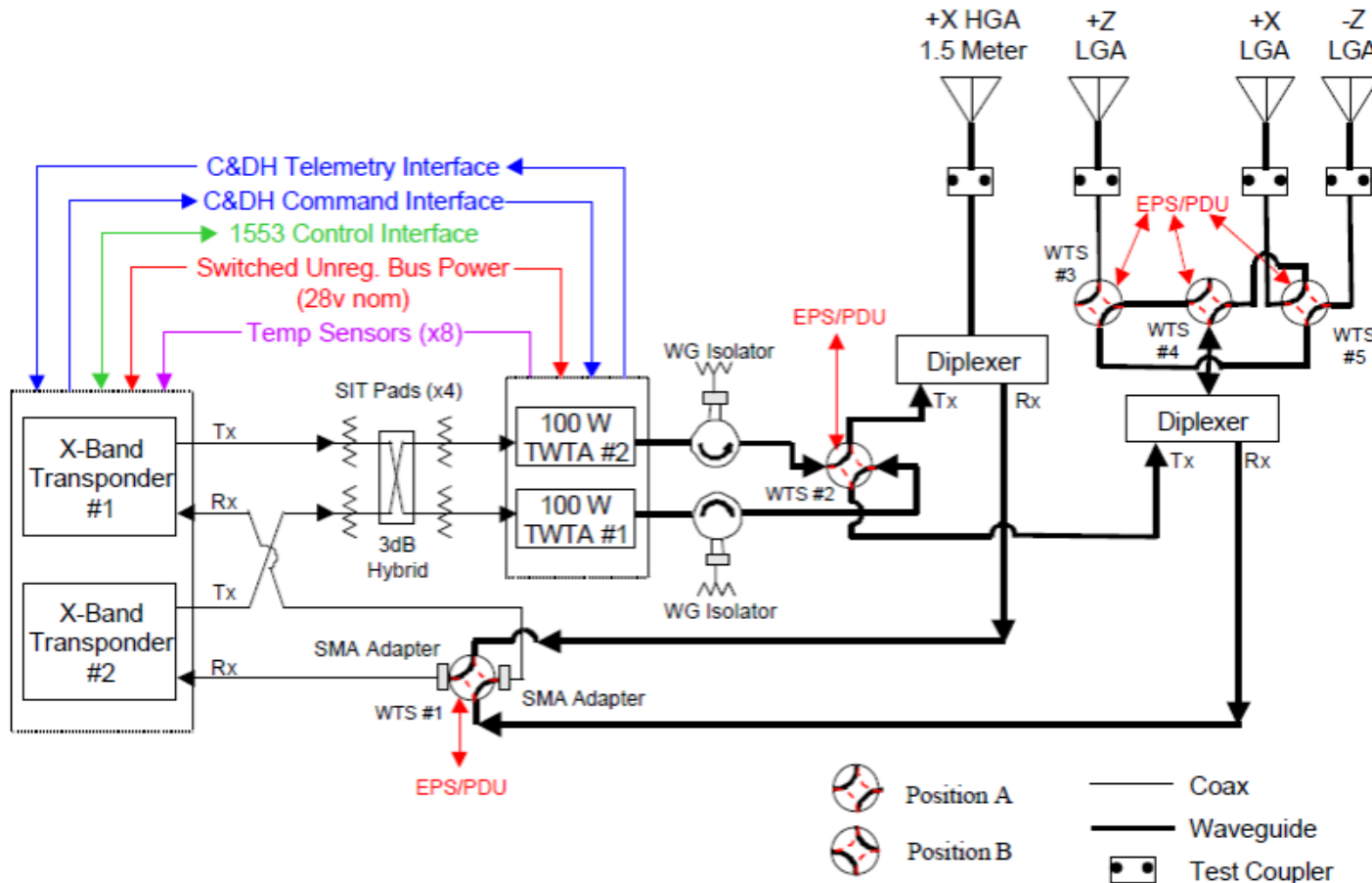


Figure 1-8. Telecom subsystem functions and interfaces.

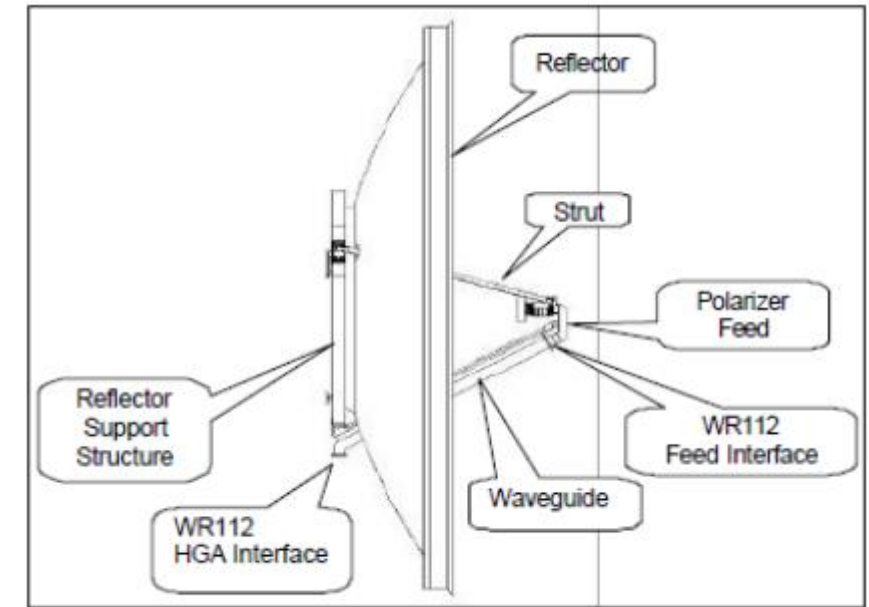


Figure 2-3. High gain antenna assembly.

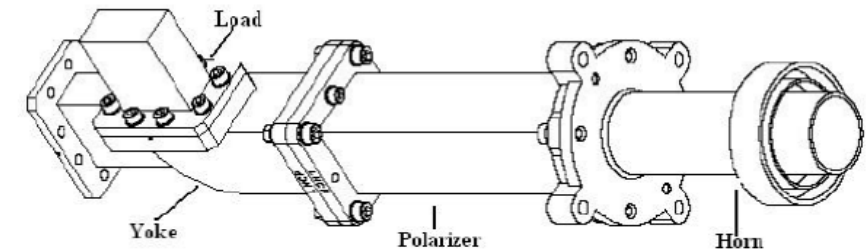
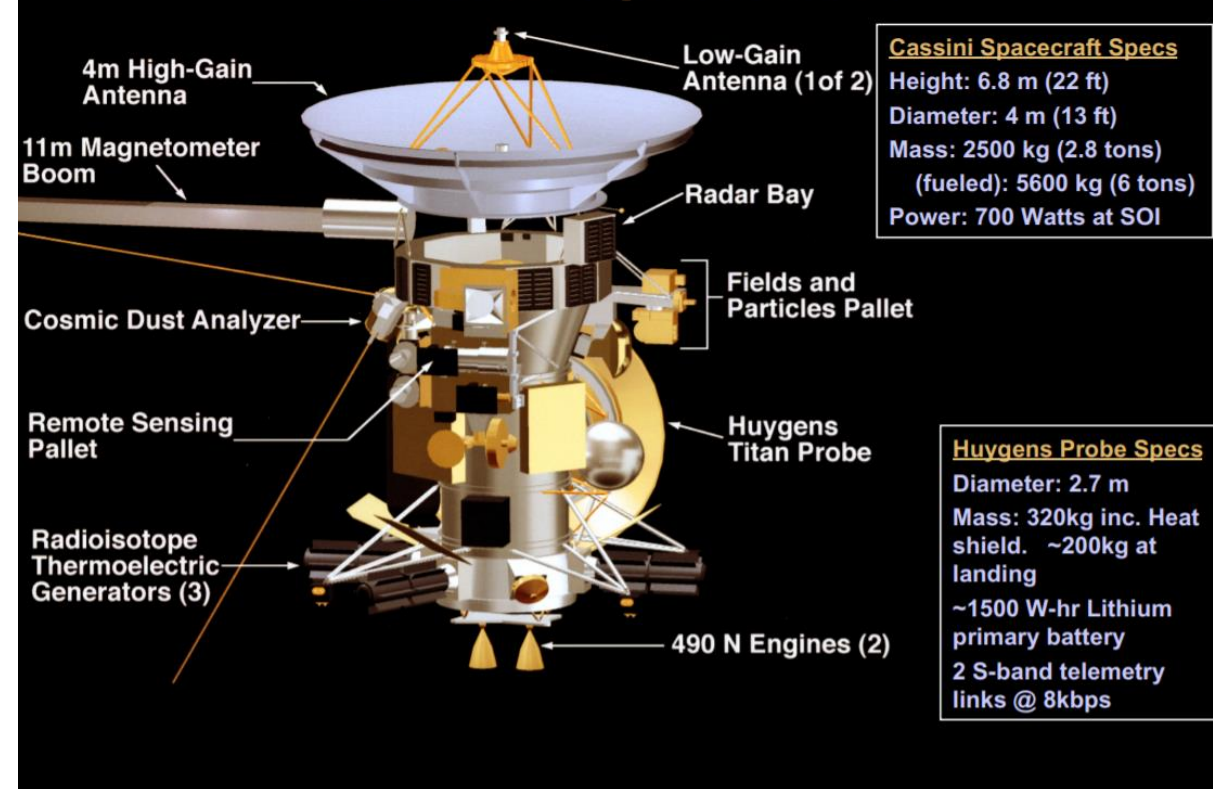


Figure 2-4. LGA Assembly (each LGA).

Антенны – межпланетные миссии

Cassini Spacecraft



Juno Spacecraft



Антенны – межпланетные миссии (Juno)



Figure 2-4: Juno TWT with electronic power converter.

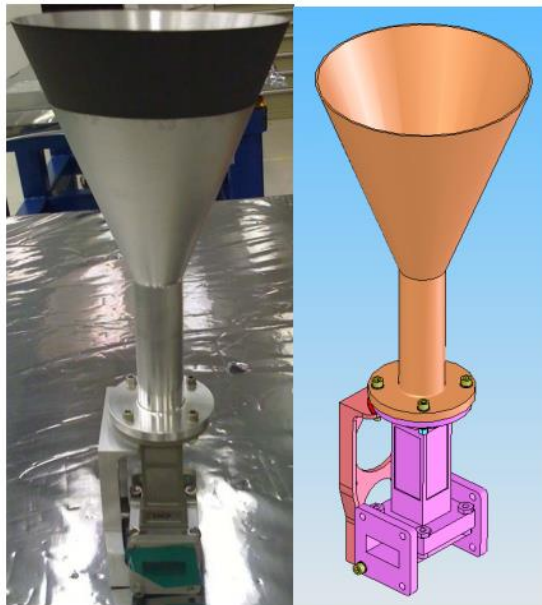
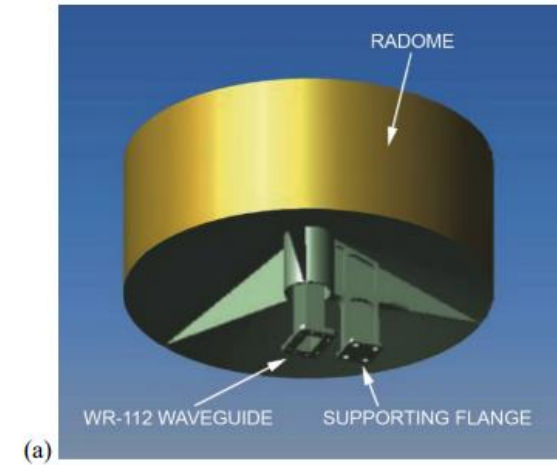


Figure 2-13: Photograph (left) and drawing (right) of the MGA.

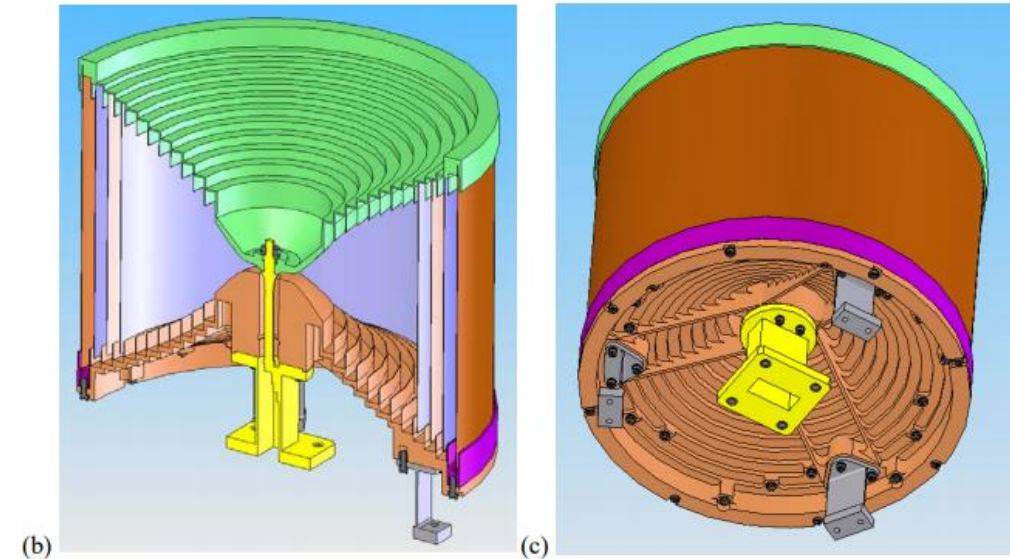


Figure 2-10: External and internal views of TLGA: (a) side view under dome; (b) biconical horn; (c) bottom and waveguide connector.

Антенны – межпланетные миссии (Cassini - Сатурн)

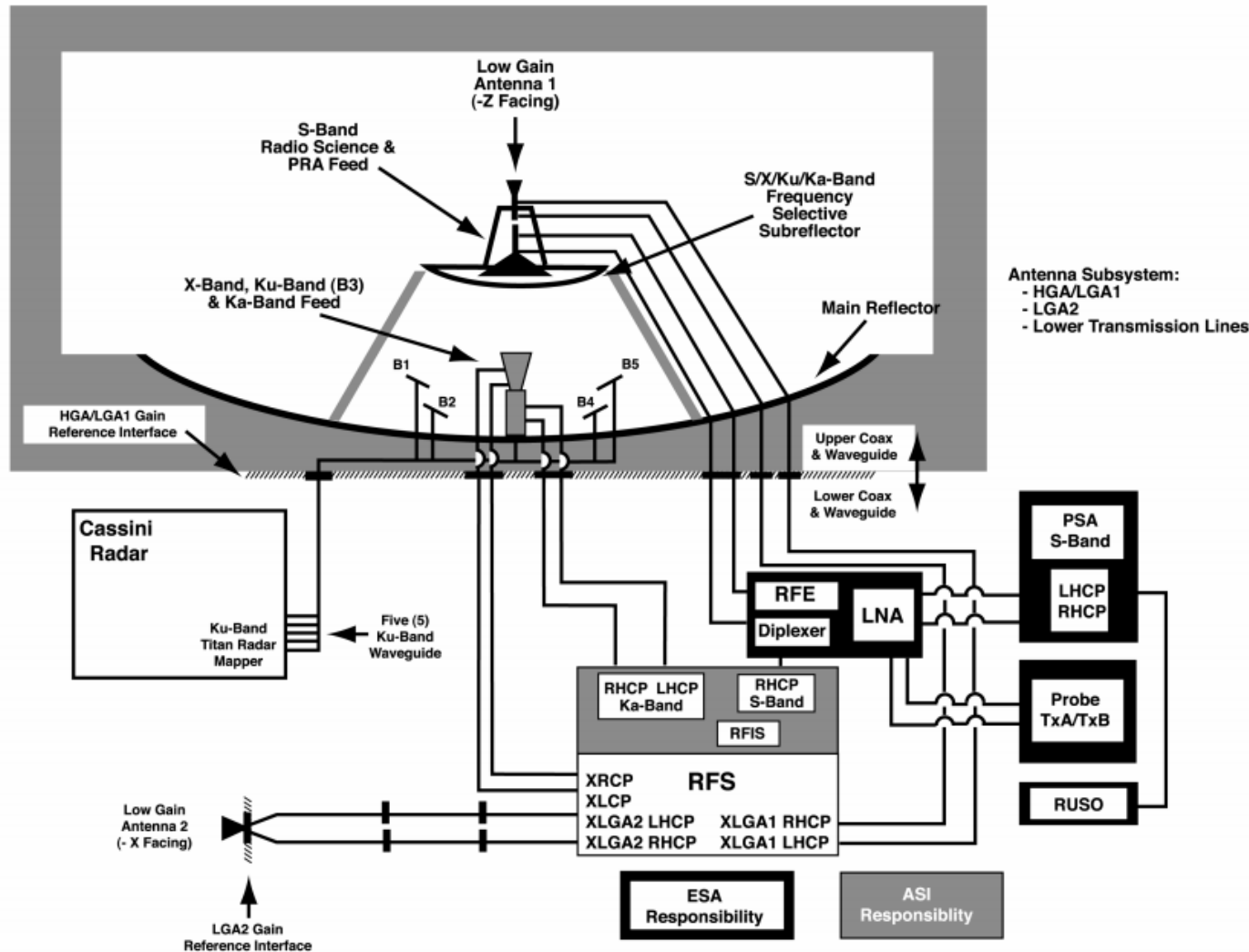


Fig. 3-2. Antenna functional block diagram.

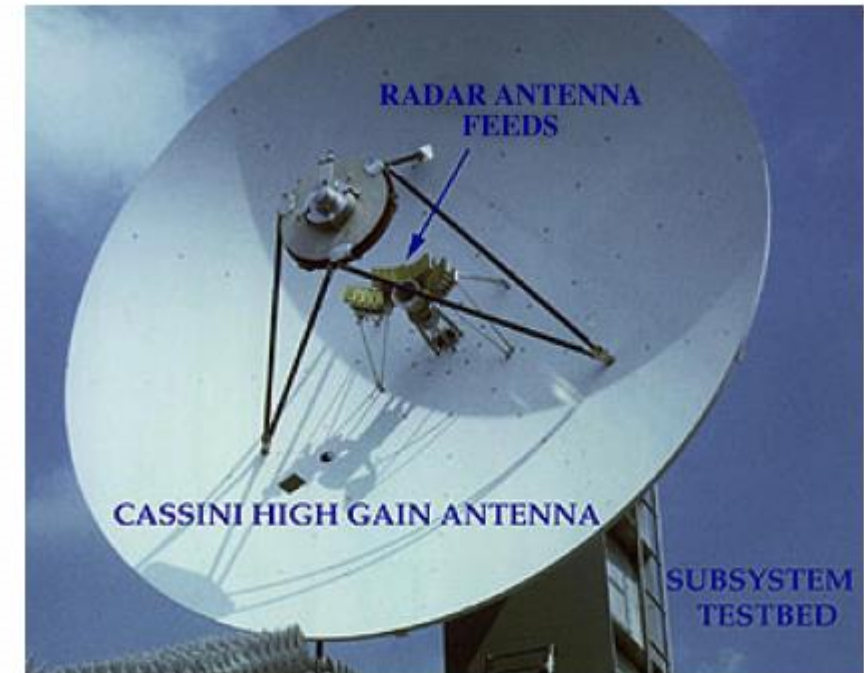


Fig. 3-3. Cassini high-gain antenna.

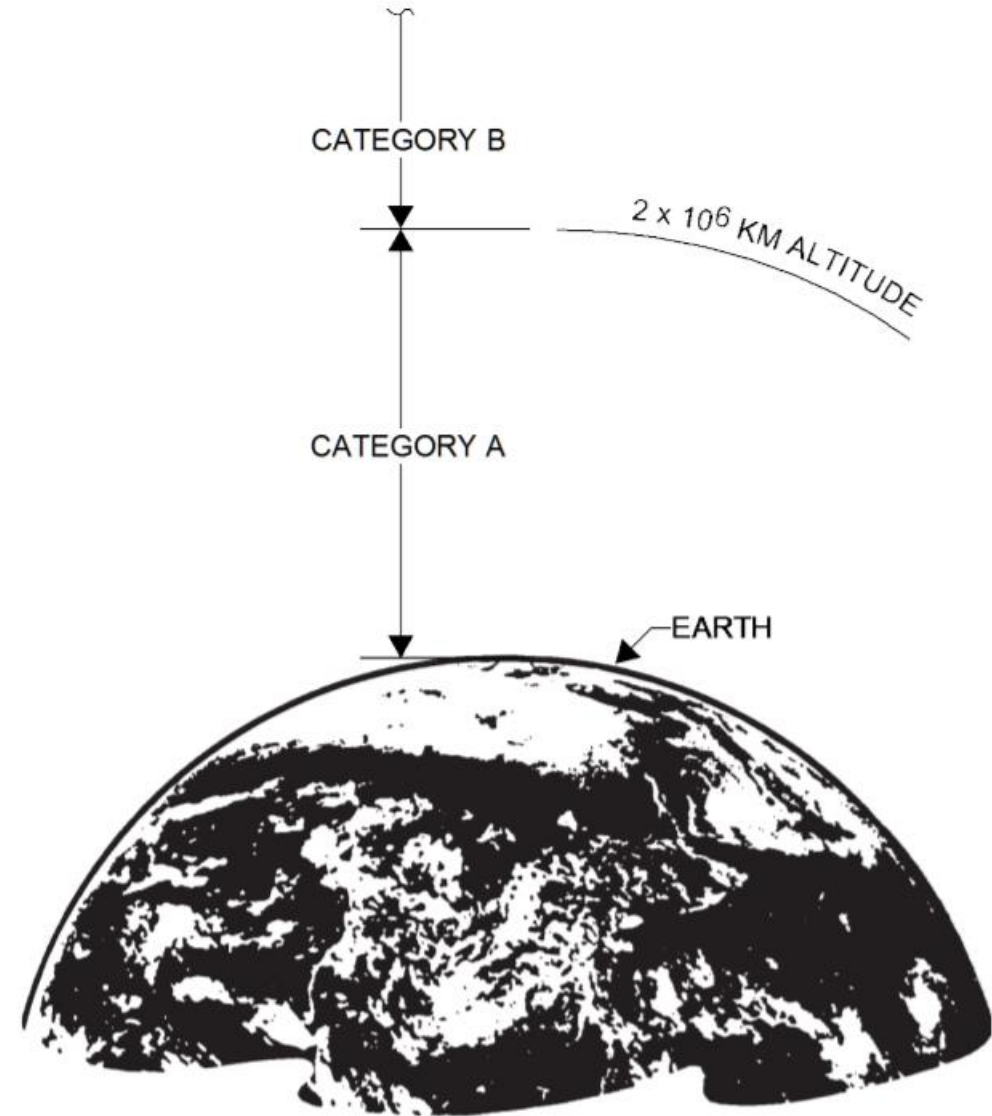
Частотные диапазоны

Table 1. Spacecraft Transponder Turnaround Ratios†

Uplink	Downlink	Ratio (downlink/uplink)
S	S	240/221
S	X	880/221
S	K _a	15.071 – 15.235*
X	S	240/749
X	X	880/749
X	K _a	4.4506 – 4.4923*
K _a	S	0.066959 – 0.066282*
K _a	X	0.24561 – 0.24352*
K _a	K _a	0.92982 – 0.93084*

Table 2. Allocated Frequency Bands

Band Designation	Deep Space Bands (for spacecraft greater than 2 million km from Earth)		Near Earth Bands (for spacecraft less than 2 million km from Earth)	
	Uplink (Earth to space)	Downlink (space to Earth)	Uplink (Earth to space)	Downlink (space to Earth)
S-band	2110–2120*	2290–2300	2025–2110	2200–2290
X-band	7145–7190	8400–8450	7190–7235	8450–8500
K-band	**	**	**	25500–27000
Ka-band	34200–34700	31800–32300	**	**



Deep Space Network (DSN) - Местоположение



Table 1.1: Deep Space Network Complexes

Name	Longitude	Latitude	Antennas
Goldstone	116° 46' 44" W	35° 16' 53" N	DSS-14 (70 m), DSS-24, DSS-25, DSS-26 (34 m)
Canberra	148° 58' 56" E	35° 24' 06" S	DSS-43 (70 m), DSS-34, DSS-35, DSS-36 (34 m)
Madrid	4° 14' 59" W	40° 25' 45" N	DSS-63 (70 m), DSS-54, DSS-55 (34 m)

Deep Space Network (DSN) – Онлайн сервисы



Jet Propulsion Laboratory | California Institute of Technology

DEEP SPACE NETWORK NOW

LAST UPDATED: SEP 2 5:11 PM (UTC)

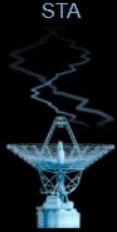
[DSN home](#)




MADRID

SEP 2
7:12 PM

STA



63

SOHO



65

SPP



54

ACE



55

56



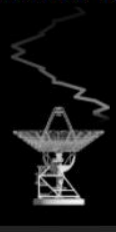
GOLDSTONE

SEP 2
10:12 AM

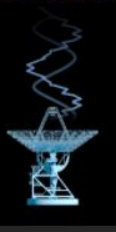
M01O M20 TGO MRO MVN MSL



14



24



25



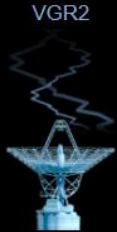
26



CANBERRA

SEP 3
3:12 AM

VGR2



43

MMS1



34

JNO

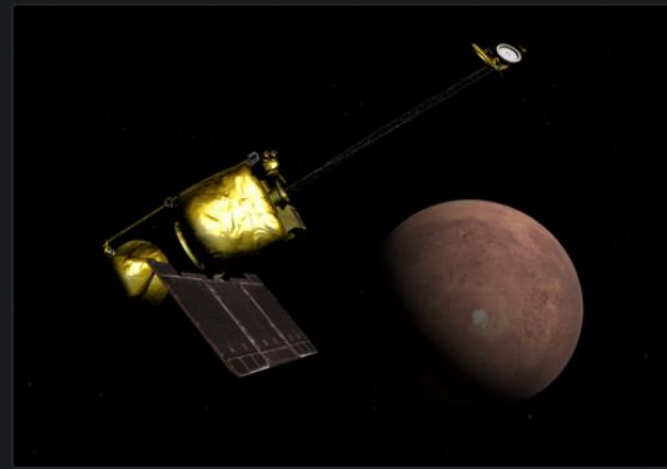


35

36

TARGET

MARS ODYSSEY



[VIEW ANTENNA](#)
[VIEW SPACECRAFT](#)
[VIEW WORLD MAP](#)

[M01O](#)
[M20](#)
[TGO](#)

SPACECRAFT

NAME
Mars Odyssey

RANGE
393.11 million km

ROUND-TRIP LIGHT TIME

[+ more detail](#)

[credits](#) [contact us](#)

Deep Space Network (DSN) – Антенные системы



Антенная система DSS-14, Канберра (70 м)



Антенная система DSS-24, Канберра (34 м)

Deep Space Network (DSN) – параметры станций 70 м

Параметр	Значение	
	Передача	Приём
Частотный диапазон, МГц		
S-диапазон	2090 – 2091, 2110 – 2118	2200 – 2300
X-диапазон	7145 – 7190	8200 – 8600
Коэффициент усиления, дБ		
S-диапазон	62,95 ± 0,2 (2115 МГц)	63,59 ± 0,1 (2295 МГц)
X-диапазон	72,92 ± 0,2 (7145 МГц)	74,55 ± 0,1 (8420 МГц)
Ширина диаграммы направленности (минус 3 дБ), °		
S-диапазон	0,128 ± 0,013	0,118 ± 0,012
X-диапазон	0,038 ± 0,004	0,032 ± 0,003
Поляризация	RHCP, LHCP	
Коэффициент эллиптичности, дБ		
S-диапазон	2,2	0,6
X-диапазон	1	0,8
ЭИИМ, дБмВт		-
S-диапазон	131,6	
X-диапазон	144,5	
Шумовая температура антенны, К		
S-диапазон		12,22 – 26,85
X-диапазон		11,65 – 12,64
Ошибки наведения (3σ), дБ	0,1	0,1

Deep Space Network (DSN) – параметры станций 34 м

Параметр	Значение	
	Передача	Приём
Частотный диапазон, МГц		
S-диапазон	2025 – 2110	2200 – 2300
X-диапазон	7145 – 7190	8200 – 8600
Коэффициент усиления, дБ		
S-диапазон	55,94 ± 0,2 (2070 МГц)	56,07 ± 0,25 (2295 МГц)
X-диапазон	67,05 ± 0,2 (7145 МГц)	68,41 ± 0,2 (8420 МГц)
Ширина диаграммы направленности (минус 3 дБ), °		
S-диапазон	0,258 ± 0,004	0,242 ± 0,02
X-диапазон	0,0777 ± 0,004	0,066 ± 0,004
Поляризация	RHCP, LHCP	
Коэффициент эллиптичности, дБ		
S-диапазон	1	1
X-диапазон	1	0,8
ЭИИМ, дБмВт		-
S-диапазон	108,8 ± 0,35	
X-диапазон	139,8 +0,2/-1	
Шумовая температура антенны, К		
S-диапазон		34 – 41,76
X-диапазон	-	9,68 – 41,56
Ошибки наведения (3σ), дБ	0,1	0,1

European Space Tracking Network (ESTRACK) - ESA



- x3 35-m (New Norcia, Cebreros, Malargüe)
- x3 15-m (Kourou, Kiruna, Redu)
- x1 13-m (Kiruna)

- x1 5.5-m (Santa-Maria)
- x1 4.5-m (New-Norcia 2)
- x1 2-m (Malindi, Kenya)

European Space Tracking Network (ESTRACK) – Антенные системы



Антенная система New Norcia (Австралия) (35 м)



Антенная система Cebreros (Испания) (35 м)

Сеть дальней космической связи (РФ) – Антенные системы



Антенная система РТ-70 (Евпатория) (70 м)



Антенная система РТ-64 (Медвежьи озера) (64 м) 21

Расчет бюджета радиолинии

Исходные данные

1. Расстояние
2. Частотный диапазон
3. Необходимость траекторных измерений
4. Планетарные и космические шумы
5. Параметры наземного сегмента
6. Тип кодера/декодера
7. Тип модуляции
8. Ограничения со стороны КА

$$P_{RX} = EIRP + 10\log_{10}\left(\frac{G_{RX}}{T_{RX}}\right) - A_{FSL} - A_{ATM} - A_{POINT} - A_{POL} - A_{SYNC} - A_{DEMOD}$$

$EIRP$ — Эффективная изотропная излучаемой мощность, дБ · Вт

G_{RX} — коэффициент усиления приёмной антенны

T_{RX} — полная шумовая температура приёмного тракта

A_{FSL} — потери в свободном пространстве, дБ

A_{ATM} — потери в атмосфере (газы, замирания, туман и т. д.), дБ

A_{POL} — поляризационные потери, дБ

A_{SYNC} — потери на синхронизацию, дБ

A_{DEMOD} — аппаратные потери демодуляции

$$BitRate = CoodeRate \cdot 10^{0,1 \cdot (P_{RX} - N_0 - \frac{E_b}{N_{0MIN}} - \frac{E_b}{N_{0MARGIN}})}$$

$CoodeRate$ — кодовая скорость

$N_0 = 10\log_{10}(k)$ — спектральная плотность шума

$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ м}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-2} \cdot \text{К}^{-1}$ — Постоянная Больцмана

$\frac{E_b}{N_{0MIN}}$ — минимальный запас по энергетике для выбранной схемы кодирования модуляция, дБ

$$\frac{E_b}{N_{0MARGIN}} = 3 \text{ дБ} \text{ — минимальный запас по энергетике}$$

Расчет бюджета радиолинии

1. Потери в свободном пространстве
2. Потери в газах атмосферы – ITU-R P.676-11. Attenuation by atmospheric gases

$$LOSS_{fsl} = 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi \cdot f_0 \cdot D_{max}}{c} \right)$$

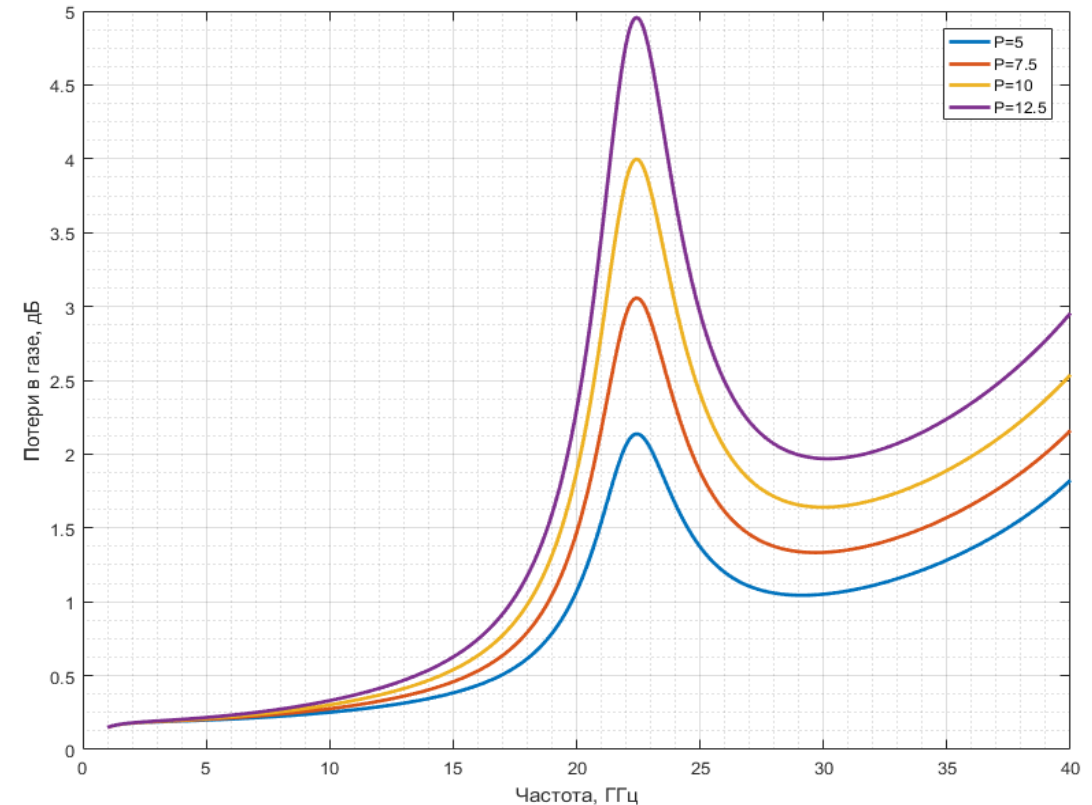
где $LOSS_{fsl}$ – потери в свободном пространстве, дБ;

f_0 – несущая частота СВЧ колебания, Гц;

c – скорость света в вакууме, м/с;

D_{max} – максимальная наклонная дальность линии связи КА – НС, м;

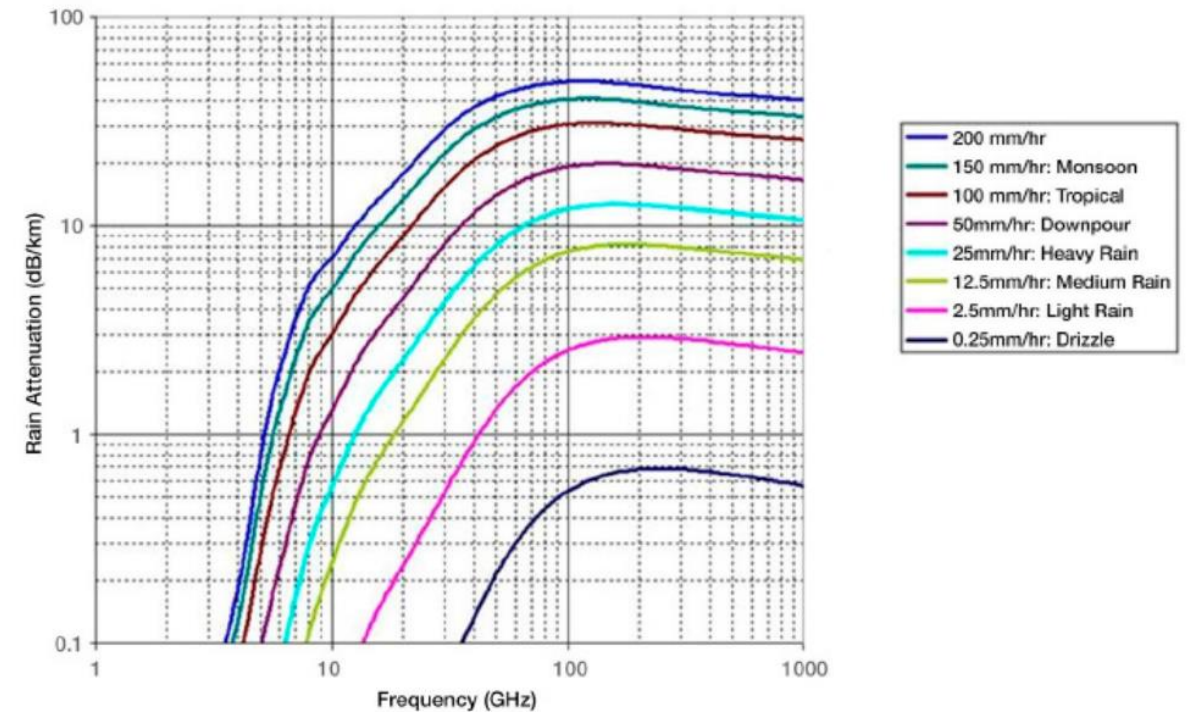
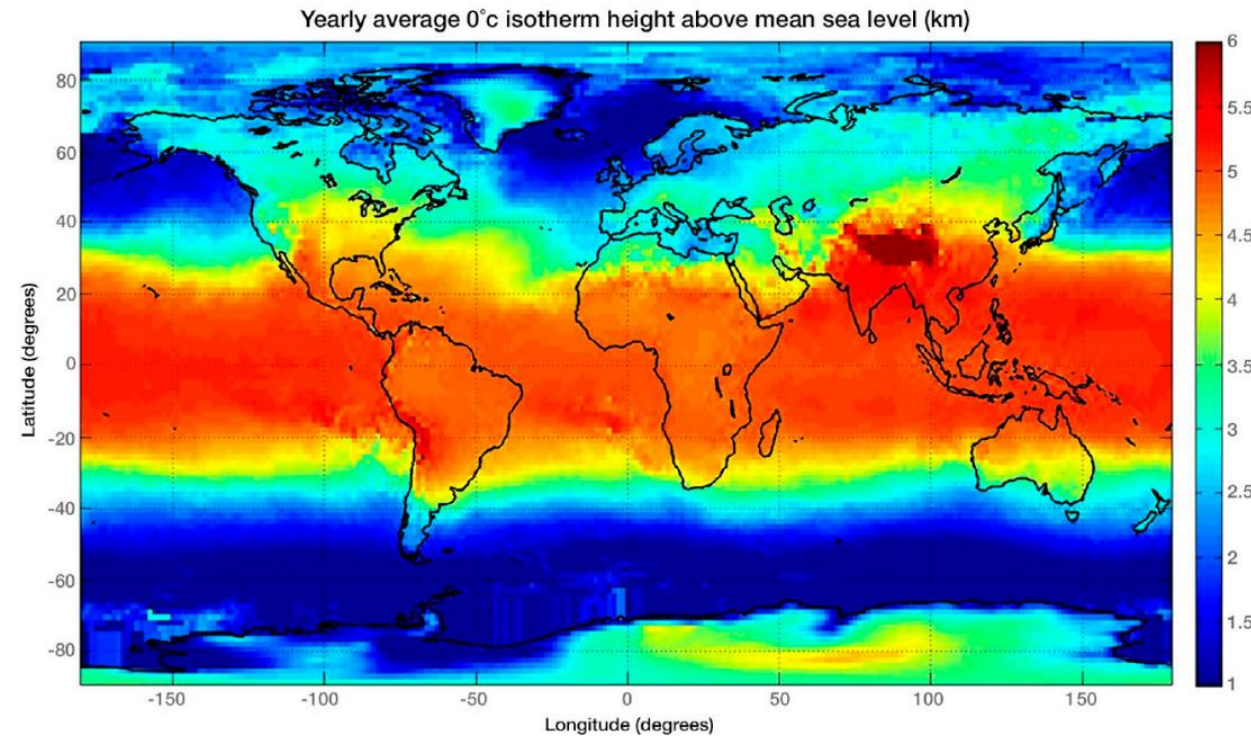
R_E – радиус Земли, м;



Суммарные потери в газах тропосферы
в зависимости от плотности водяного пара

Расчет бюджета радиолинии

3. Потери на дожде – ITU-R P.838-3. Specific attenuation model for rain for use in prediction methods



Расчет бюджета радиолинии

4. Потери на деполяризацию (Фарадеевское вращение)

5. Замирания сигнала в тропосфере (рефракция) – ITU-R P.453-12. The radio refractive index: its formula and refractivity data

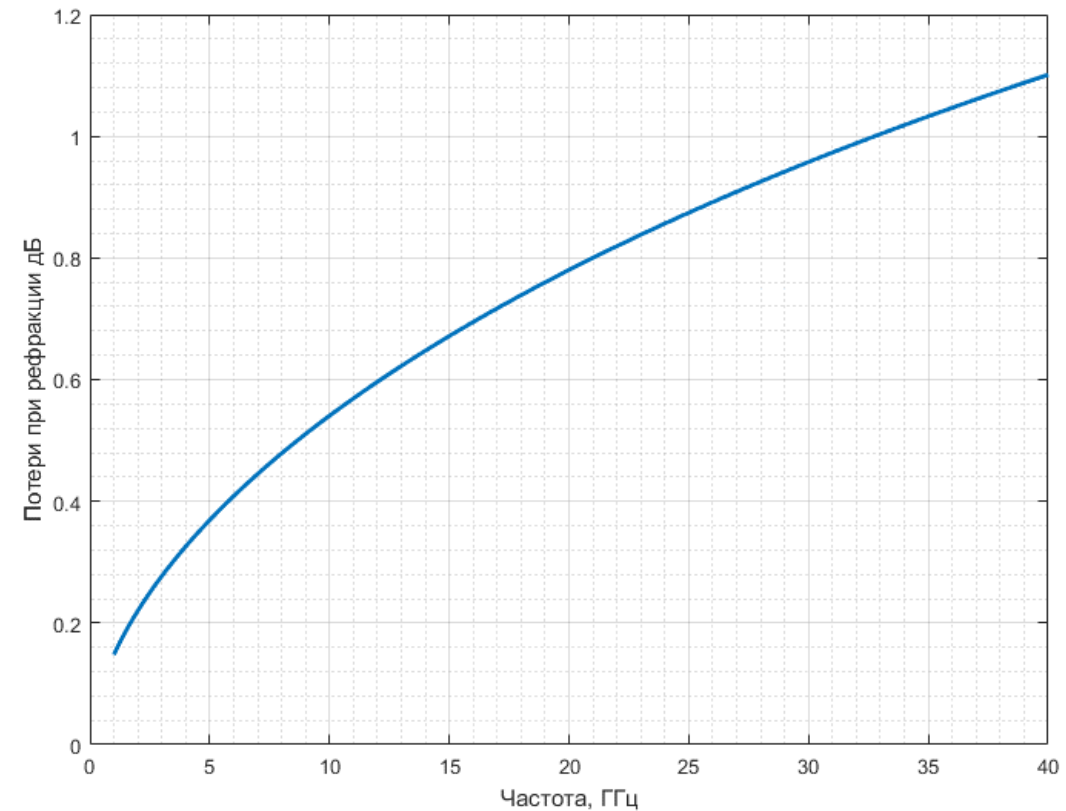
$$LOSS_{pol} = -10 \log_{10} \left(0.5 \cdot \left(1 + \frac{(1 - SA)^2 \cdot (1 + GA)^2 \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} + \varphi\right) + 4 \cdot SA \cdot RA}{(1 + SA)^2 \cdot (1 + GA)^2} \right) \right)$$

где $LOSS_{pol}$ – поляризационные потери, дБ;

φ – поворот плоскости поляризации, рад.

SA – коэффициент эллиптичности АФС [КА](#);

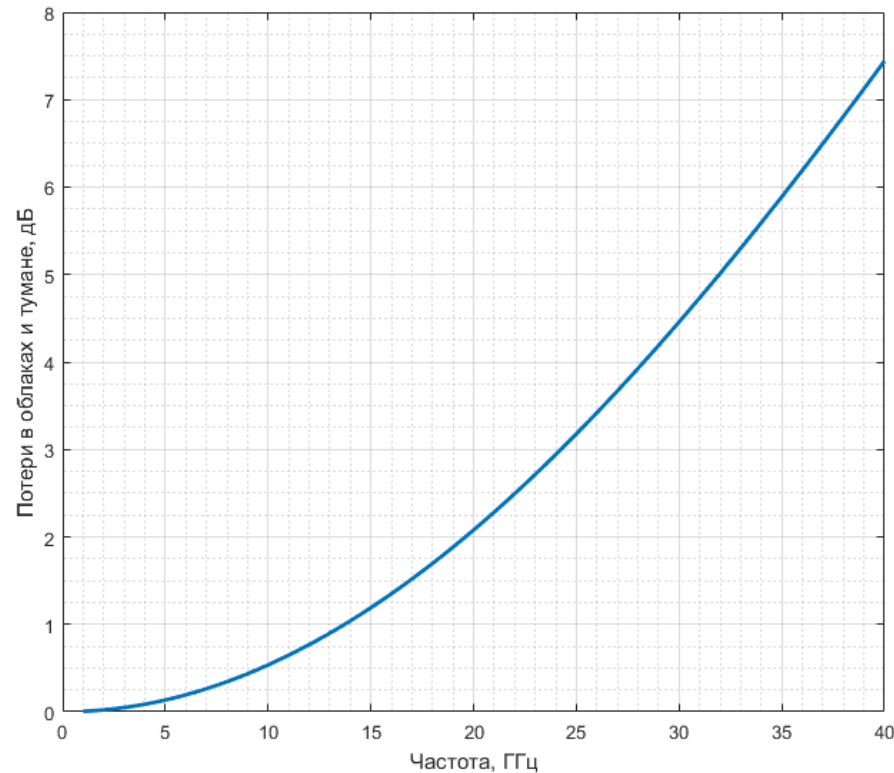
GA – коэффициент эллиптичности АФС [НС](#);



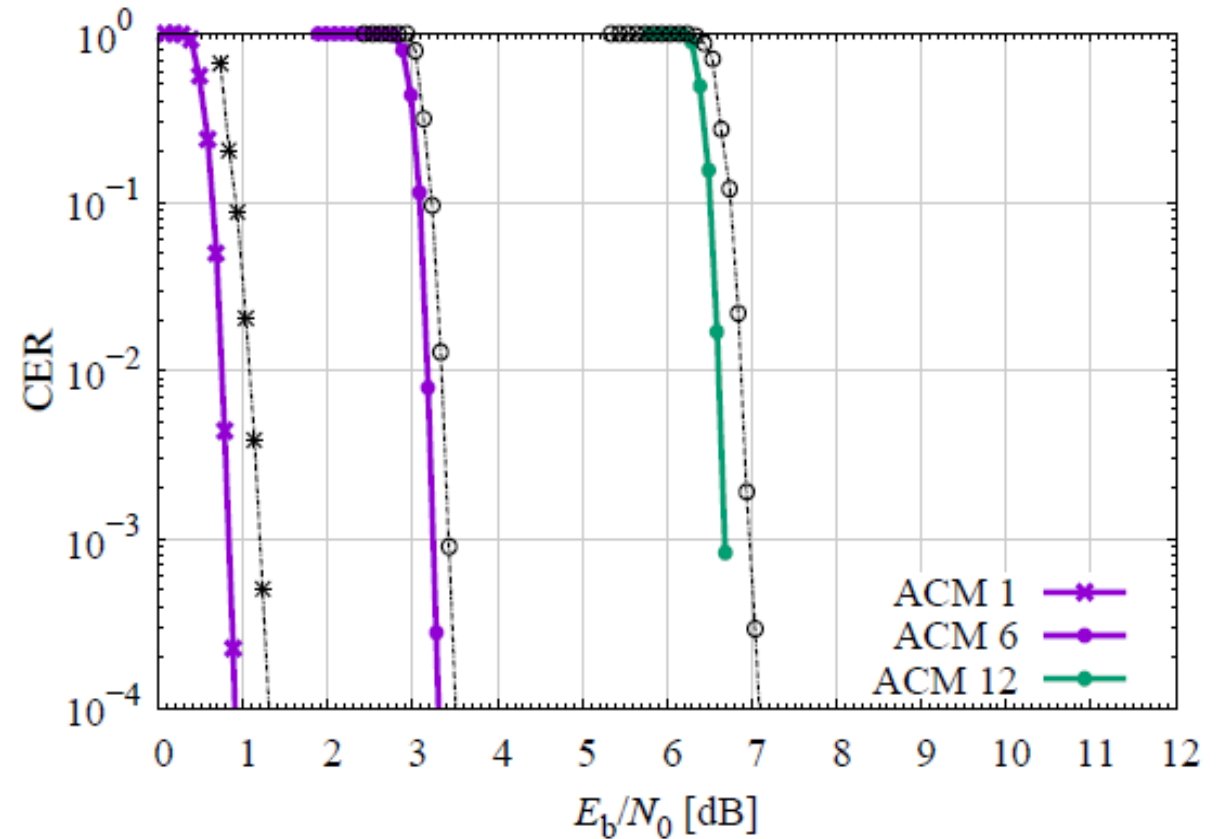
Тропосферные замирания

Расчет бюджета радиолинии

6. Потери в облаках и тумане – ITU-R P.840-6. Attenuation due to clouds and fog
7. Ошибки синхронизации
8. Нелинейные искажения в радиотрактах, искажение АЧХ



Потери в облаках и тумане



Потери на синхронизацию

Расчет бюджета радиолинии

$$G(\theta) = G_0 - G_1(\theta - \gamma)^2 - \frac{A_{ZEN}}{\sin \theta}, \text{ dBi}$$

θ = antenna elevation angle (deg.) $6 \leq \theta \leq 90$

G_0, G_1, γ = parameters from Table A-1

A_{ZEN} = zenith atmospheric attenuation

Table A-1. Vacuum Component of Gain Parameters

Configuration and Stations	Parameters†			
	G_0^* (Transmit)	G_0^* (Receive)	G_1	γ
S-band, All Stations (Figure 2)	55.40 ±	56.07	0.000006	42.0
X-band, All Stations (Figures 3—5)	67.05	68.41	0.00008	42.0

Table A-2. S- and X-Band Year-Average Zenith Atmosphere Attenuation Above Vacuum (A_{ZEN})

Weather Condition†	A_{ZEN} , dB*					
	S-band			X-band		
	DSS-15	DSS-45	DSS-65	DSS-15	DSS-45	DSS-65
Vacuum	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
CD = 0.00	0.033	0.036	0.035	0.037	0.039	0.038
CD = 0.50	0.034	0.036	0.035	0.041	0.047	0.044
CD = 0.90	0.034	0.037	0.036	0.045	0.058	0.057

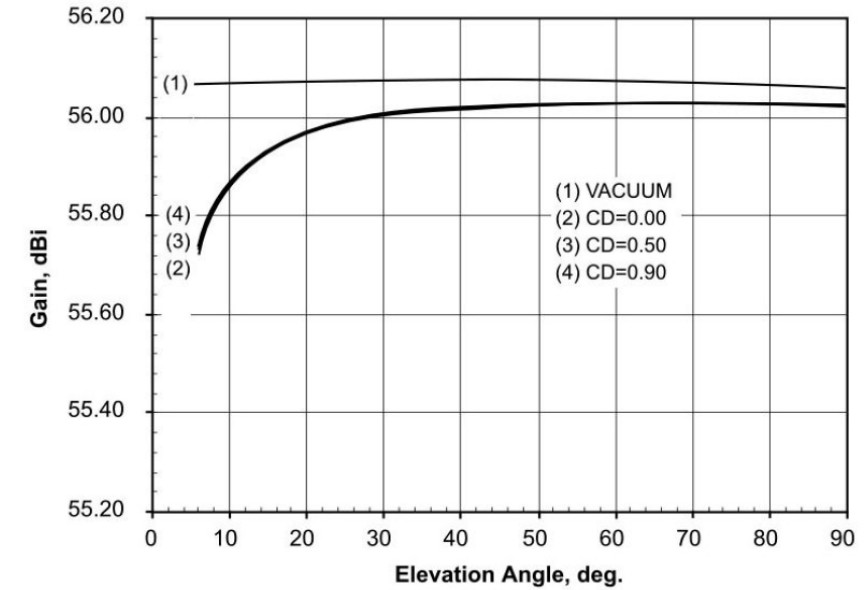


Figure 2. S-Band Receive Gain, All HEF Antennas, at Feedhorn Aperture

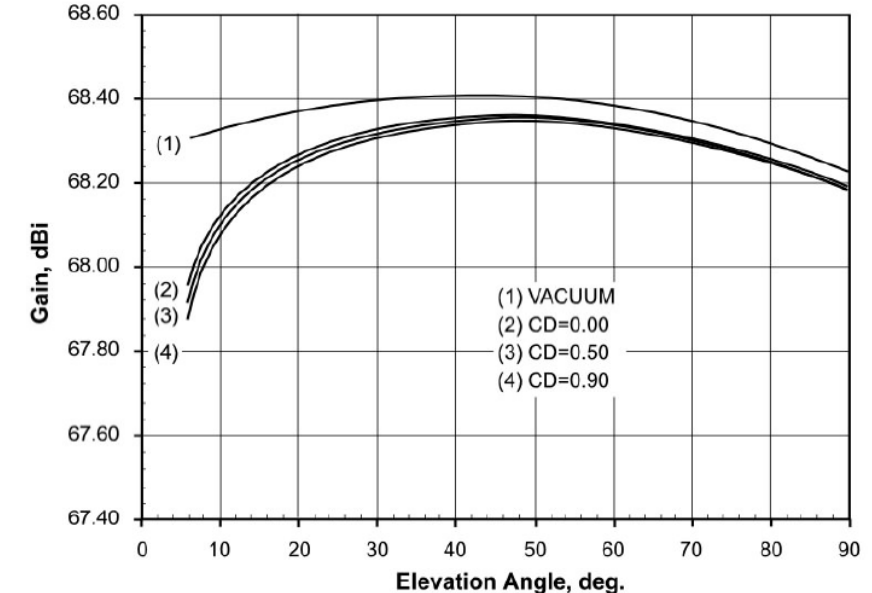


Figure 3. X-Band Receive Gain, DSS-15 Antenna, at Feedhorn Aperture

Расчет бюджета радиолинии

System operating noise temperature:

$$T_{op}(\theta) = T_{AMW} + T_{sky} = [T_1 + T_2 e^{-a\theta}] + [T_{atm}(\theta) + T'_{CMB}(\theta)] \quad (A2)$$

Sky noise contribution:

$$T_{sky} = T_{atm}(\theta) + T'_{CMB}(\theta) \quad (A3)$$

Atmospheric attenuation:

$$A(\theta) = \frac{A_{zen}}{\sin(\theta)}, \text{ dB} \quad (A4)$$

Atmospheric loss factor:

$$L(\theta) = 10^{\frac{A(\theta)}{10}}, \text{ dimensionless, } > 1.0 \quad (A5)$$

Atmospheric physical temperature:

$$T_p = 255 + 25 \times CD, \text{ K} \quad (A6)$$

Atmospheric noise contribution:

$$T_{atm}(\theta) = T_p \left[1 - \frac{1}{L(\theta)} \right], \text{ K} \quad (A7)$$

Effective cosmic background noise:

$$T'_{CMB}(\theta) = \frac{T_{CMB}}{L(\theta)}, \text{ K} \quad (A8)$$

where

θ = antenna elevation angle (deg.), $6 \leq \theta \leq 90$

T_1, T_2, a = antenna-microwave noise temperature parameters from Table A-3

A_{ZEN} = zenith atmospheric attenuation, dB, from Table A-2 or from Tables 10 through 15 (S-, X-bands) in Module 105, Rev. B, as a function of frequency, station, and cumulative distribution (CD)

CD = cumulative distribution, $0 \leq CD \leq 0.99$, used to select A_{ZEN} from Table A-2 or from Tables 10 through 15 in Module 105, Rev. B

T_{CMB} = 2.725 K, cosmic microwave background noise temperature

Table A-3. Antenna-Microwave Noise Temperature Parameters, Referenced to Feedhorn Aperture

Configuration and Stations	Parameters		
	T_1^*	T_2	a
S-band , all stations, LNA-1, HEMT, non-diplexed	31.80	7.10	0.013
S-band , all stations, LNA-1, HEMT, diplexed	39.40	7.60	0.013
DSS-15, X-band, High-Gain Mode (normal configuration):			
X-band , DSS-15, LNA-1, HEMT, RCP, diplexed	9.68	5.8	0.1
X-band , DSS-15, LNA-2, HEMT, LCP, diplexed	10.54	5.8	0.1
X-band , DSS-15, LNA-1, HEMT, RCP, diplexed, w/ narrow-band radar filter	9.75	5.8	0.1
X-band , DSS-15, LNA-2, HEMT, LCP, diplexed, w/ narrow-band radar filter	10.70	5.8	0.1
DSS-15, X-band, Low-Gain Mode (high s/c received power):			
X-band , DSS-15, LNA-1, HEMT, RCP, diplexed	20.35	5.8	0.1
X-band , DSS-15, LNA-2, HEMT, LCP, diplexed	22.18	5.8	0.1
X-band , DSS-15, LNA-1, HEMT, RCP, diplexed, w/ narrow-band radar filter	30.72	5.8	0.1
X-band , DSS-15, LNA-2, HEMT, LCP, diplexed, w/ narrow-band radar filter	30.79	5.8	0.1

Расчет бюджета радиолинии

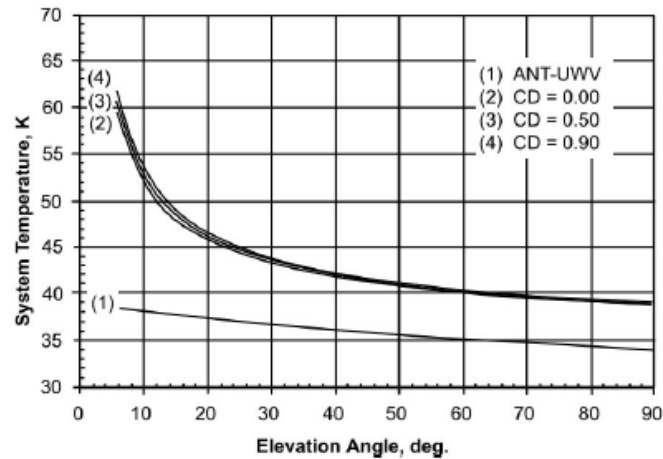


Figure 6. S-band System Noise Temperature, all HEF Antennas, LNA-1, Non-Diplexed, at Feedhorn Aperture

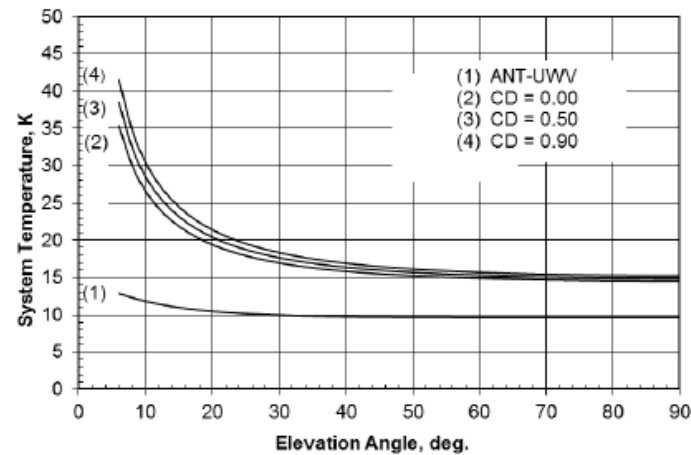


Figure 7. X-Band System Noise Temperature, DSS-15, LNA-1, HEMT, RCP, Diplexed at Feedhorn Aperture

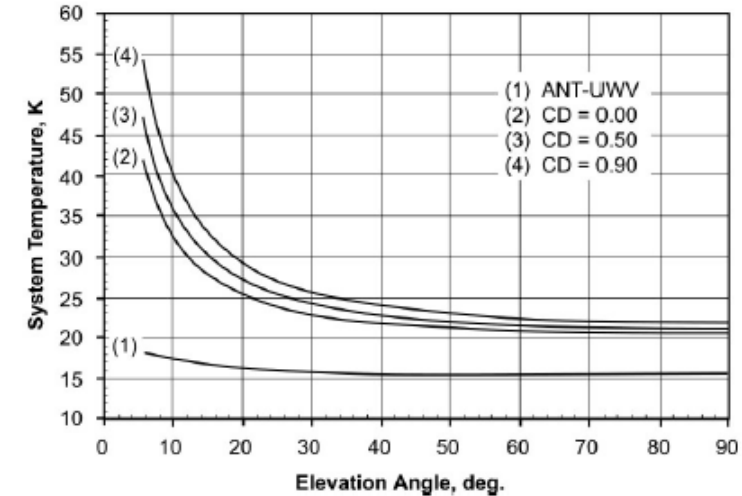


Figure 8. X-Band System Noise Temperature, DSS-45, LNA-1, Non-Diplexed, at Feedhorn Aperture

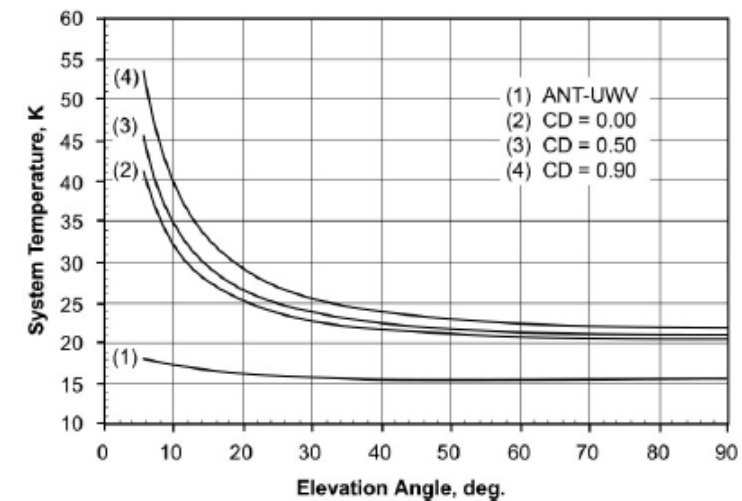


Figure 9. X-Band System Noise Temperature, DSS-65, LNA-1, Non-Diplexed, at Feedhorn Aperture

Расчет бюджета радиолинии

Table 4. Gain Reduction Due to Wind Loading, 34-m HEF Antennas

Wind Speed		X-Band Gain Reduction (dB)*
(km/hr)	(mph)	
10	6	0.0
30	19	0.01
50	31	0.06
70	43	0.21

$$\Delta G(\theta) = 10 \log \left(e^{\frac{2.773 \theta^2}{HPBW^2}} \right), \text{ dB} \quad (3)$$

θ = pointing error (deg.)

$HPBW$ = half-power beamwidth in degrees

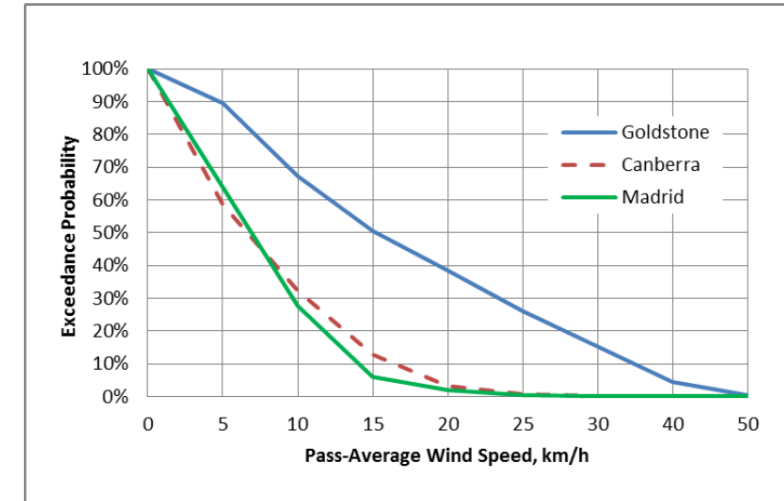


Figure 10. Pass-Average Wind Speed Exceedance Probabilities for the Three DSN Antenna Complexes

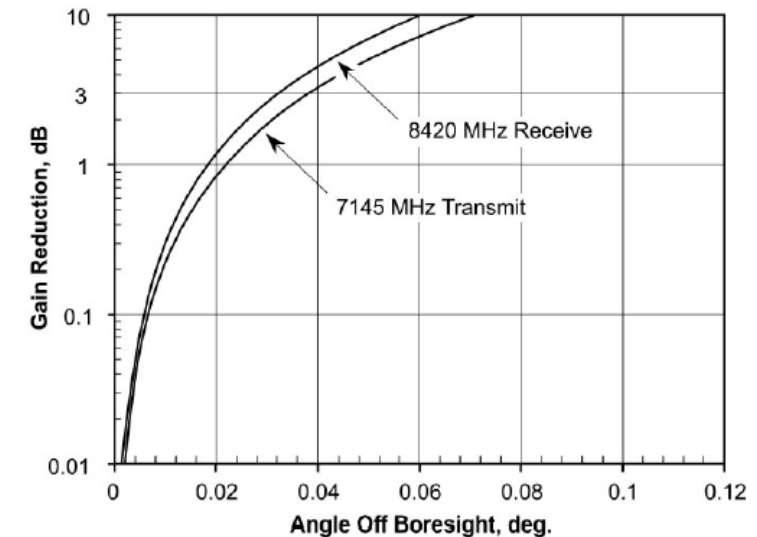


Figure 11. X-Band Gain Reduction Versus Angle Off Boresight

Измерение дальности до КА и скорости/ускорения

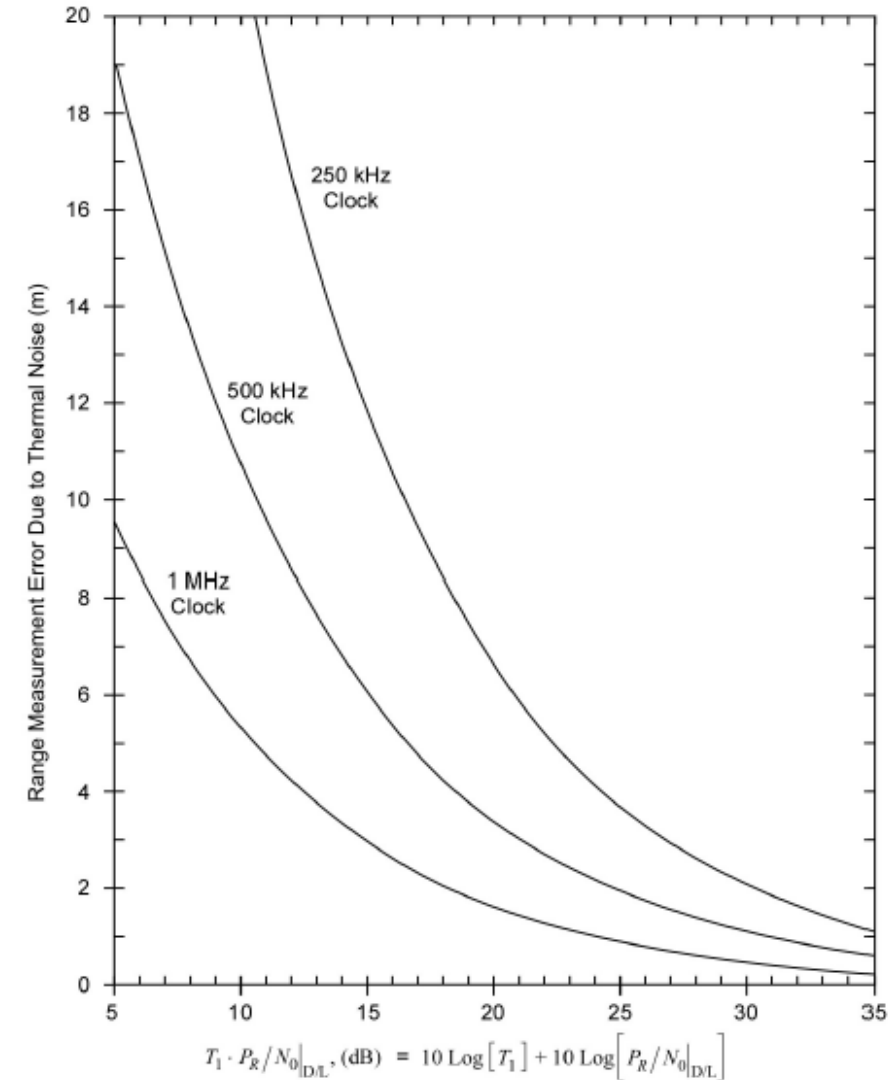
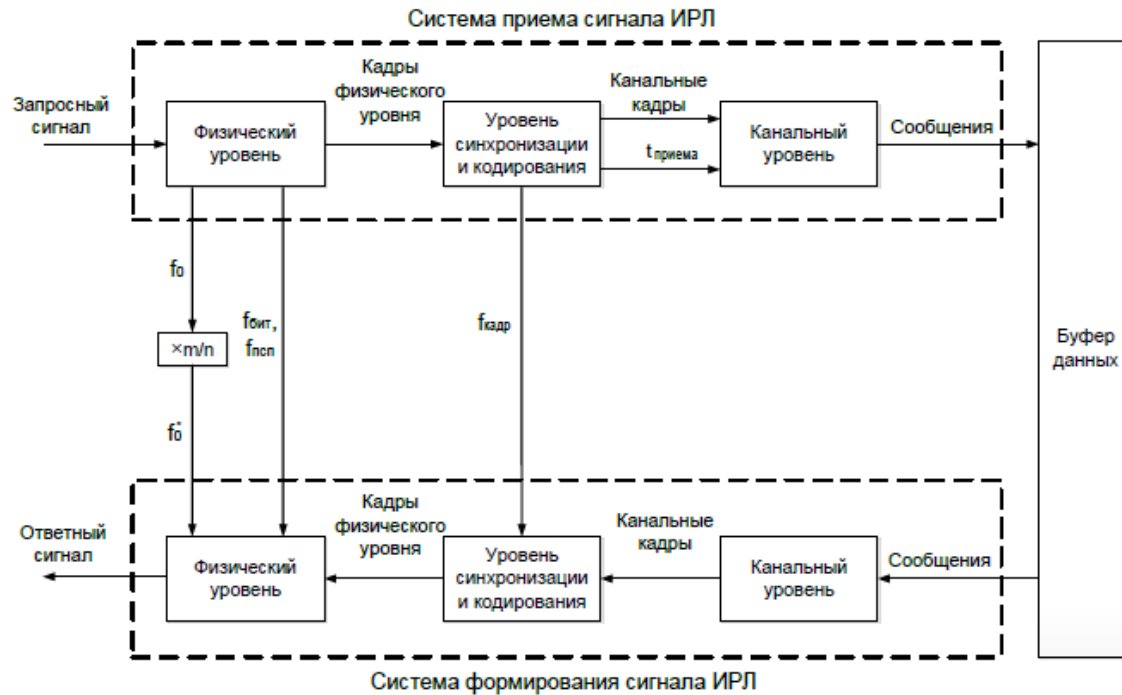
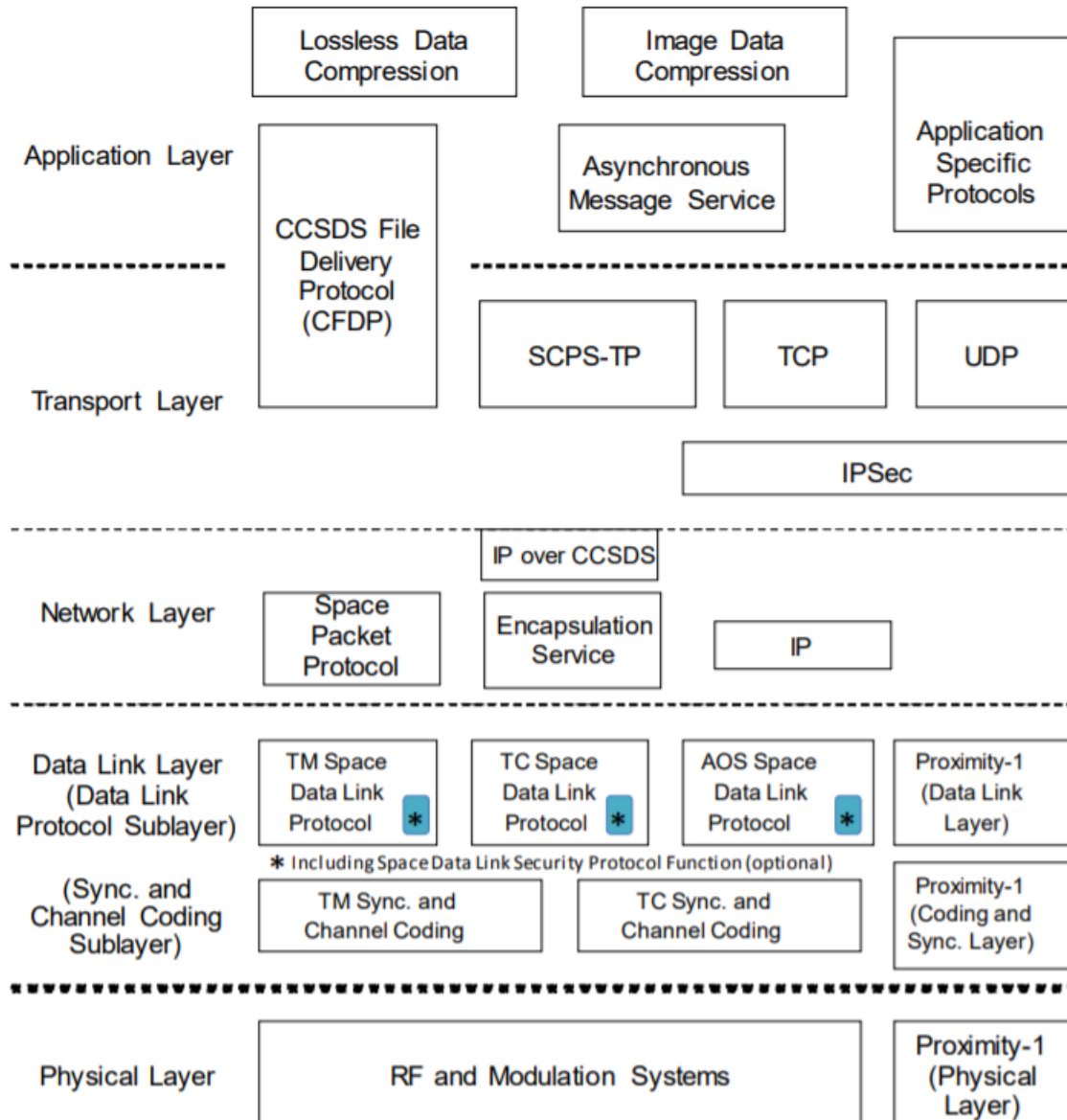


Figure 9. Two-Way Coherent Range Measurement Error for Sinewave Ranging Clocks

CCSDS – уровни OSI



Канальный уровень

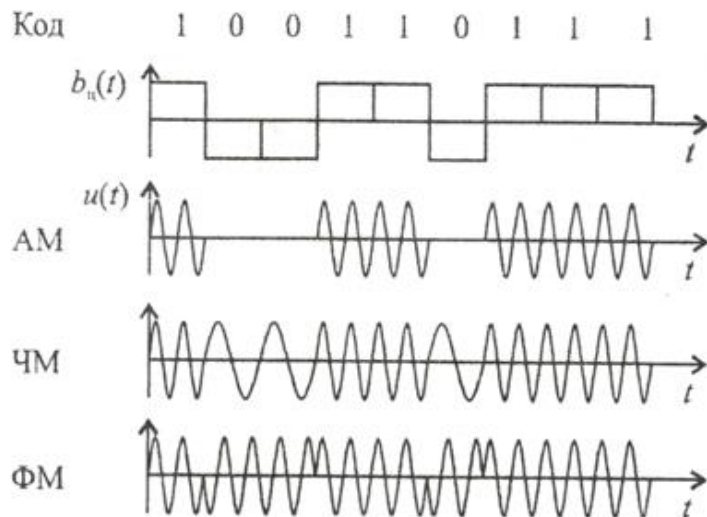
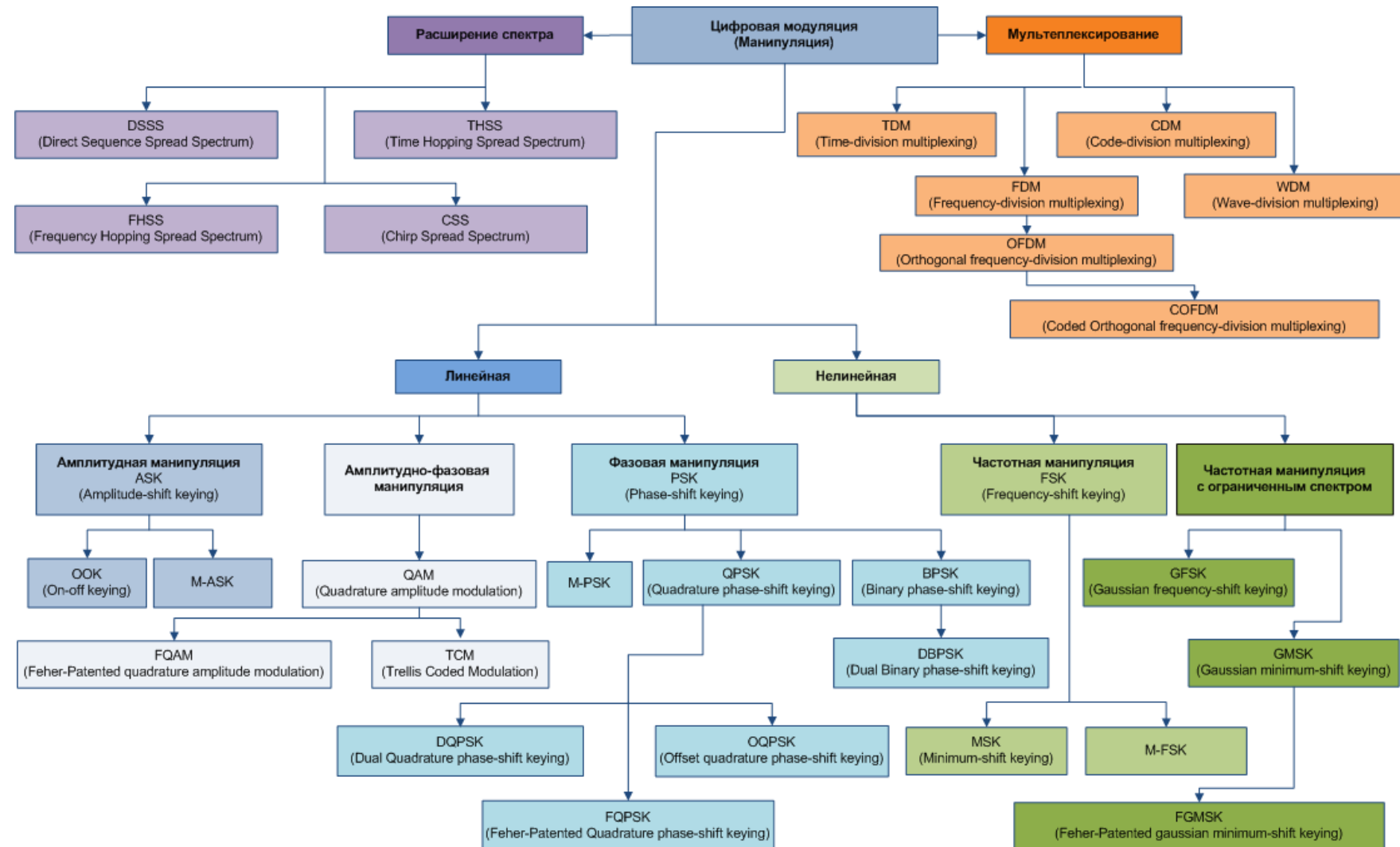
1. CCSDS 231.0-B-3 – TC Synchronization and Channel Coding
2. CCSDS 131.0-B-3 – TM Synchronization and Channel Coding
3. CCSDS 133.0-B-1 – Space packet protocol
4. CCSDS 232.1-B-2 – Communication Procedure Operation - 1
5. CCSDS 732.1-B-1 – Unified Space Data Link Protocol
6. CCSDS 732.0-B-3 – AOS Space Data Link Protocol
7. CCSDS 211.0-B-6 – Proximity-1 Space Link Protocol-Data Link Layer
8. CCSDS 211.2-B-3 – Proximity-1 Space Link Protocol-- Coding and Synchronization Sublayer

Физический уровень

1. CCSDS 401.0-B-30 – Radio frequency and modulation systems — Part 1. Earth stations and spacecraft
2. CCSDS 211.1-B-4 – Proximity-1 Space Link Protocol-- Physical Layer

CCSDS – модуляция

Модуляция — процесс изменения одного или нескольких параметров модулируемого несущего сигнала при помощи модулирующего сигнала.



CCSDS – модуляция

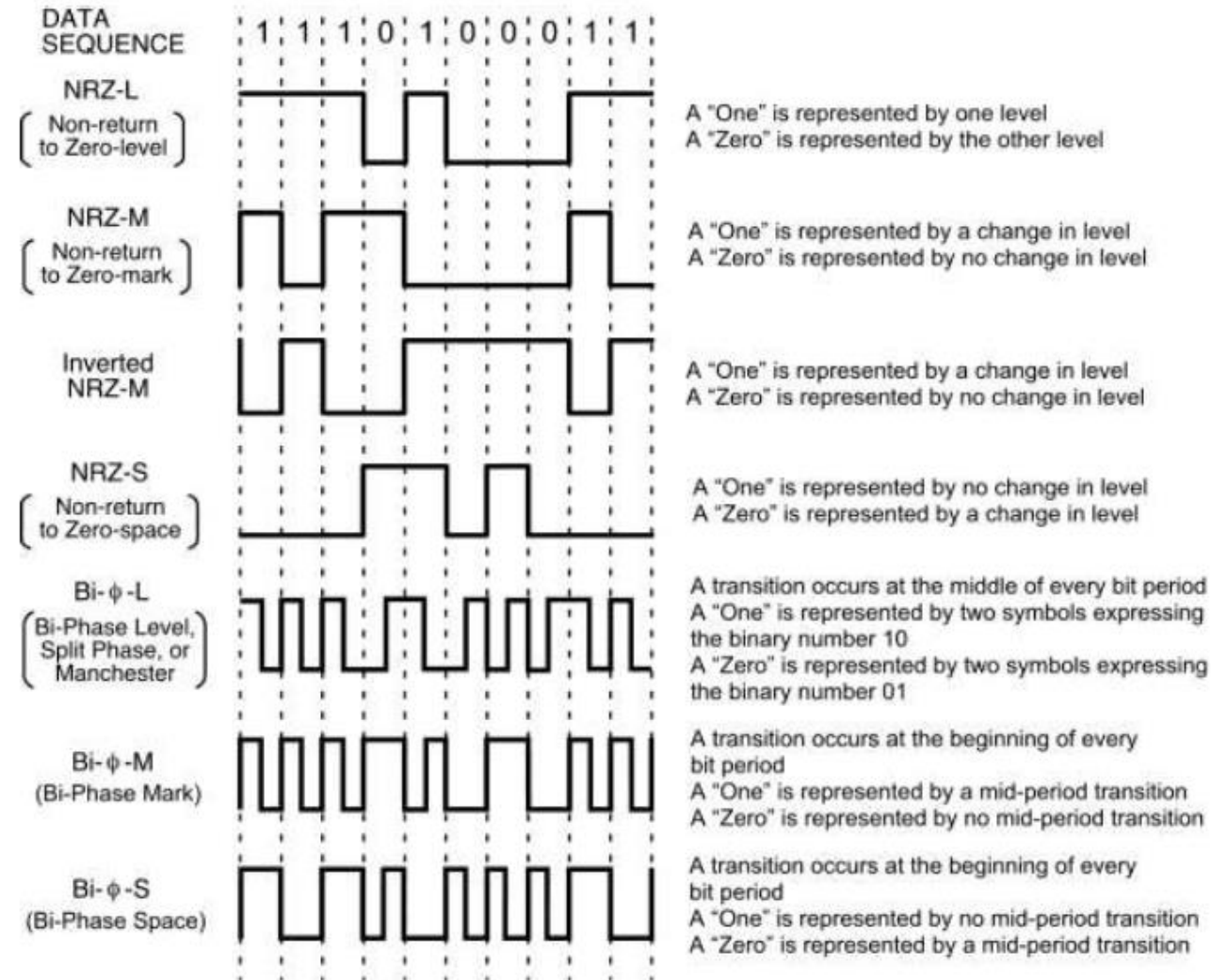
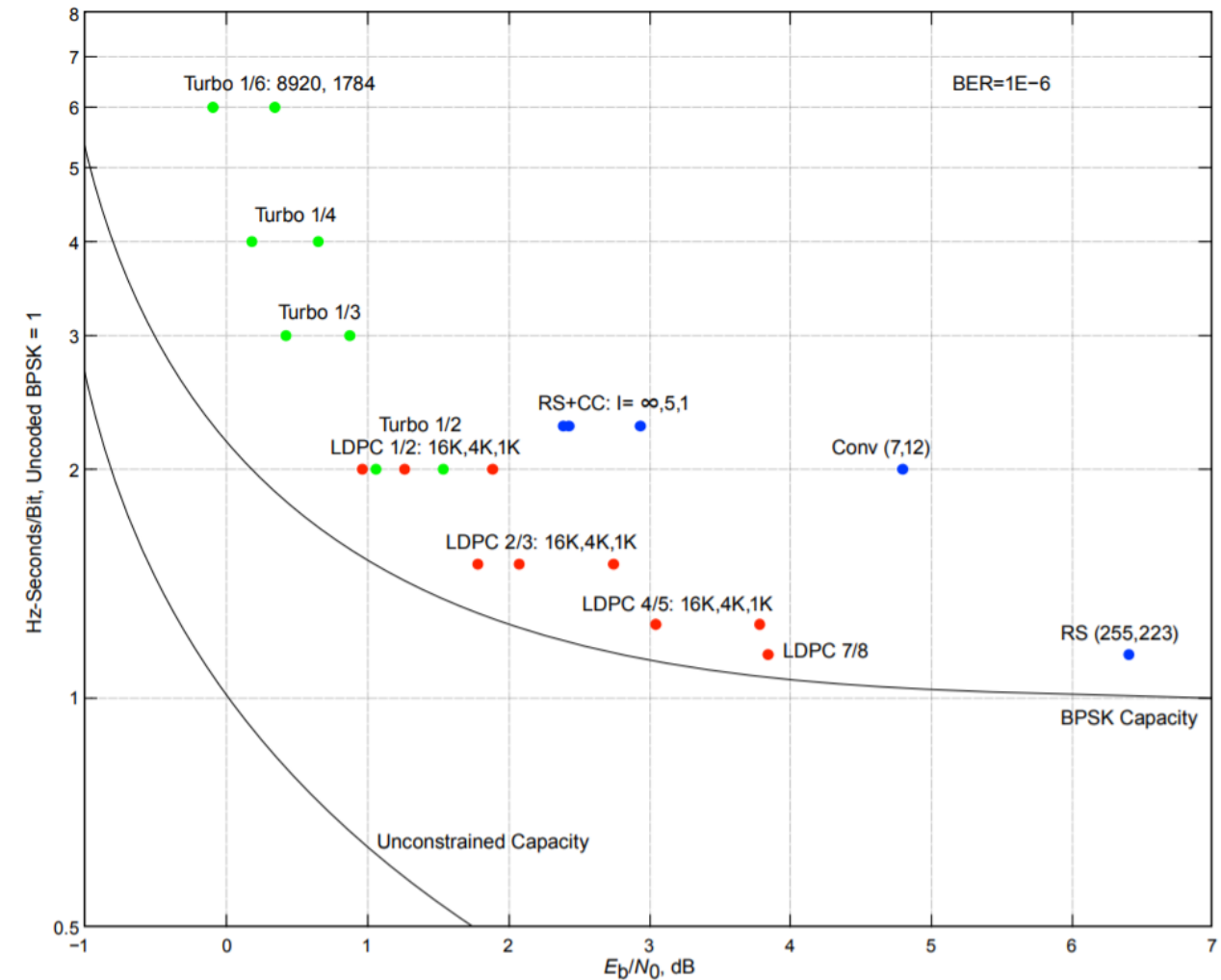
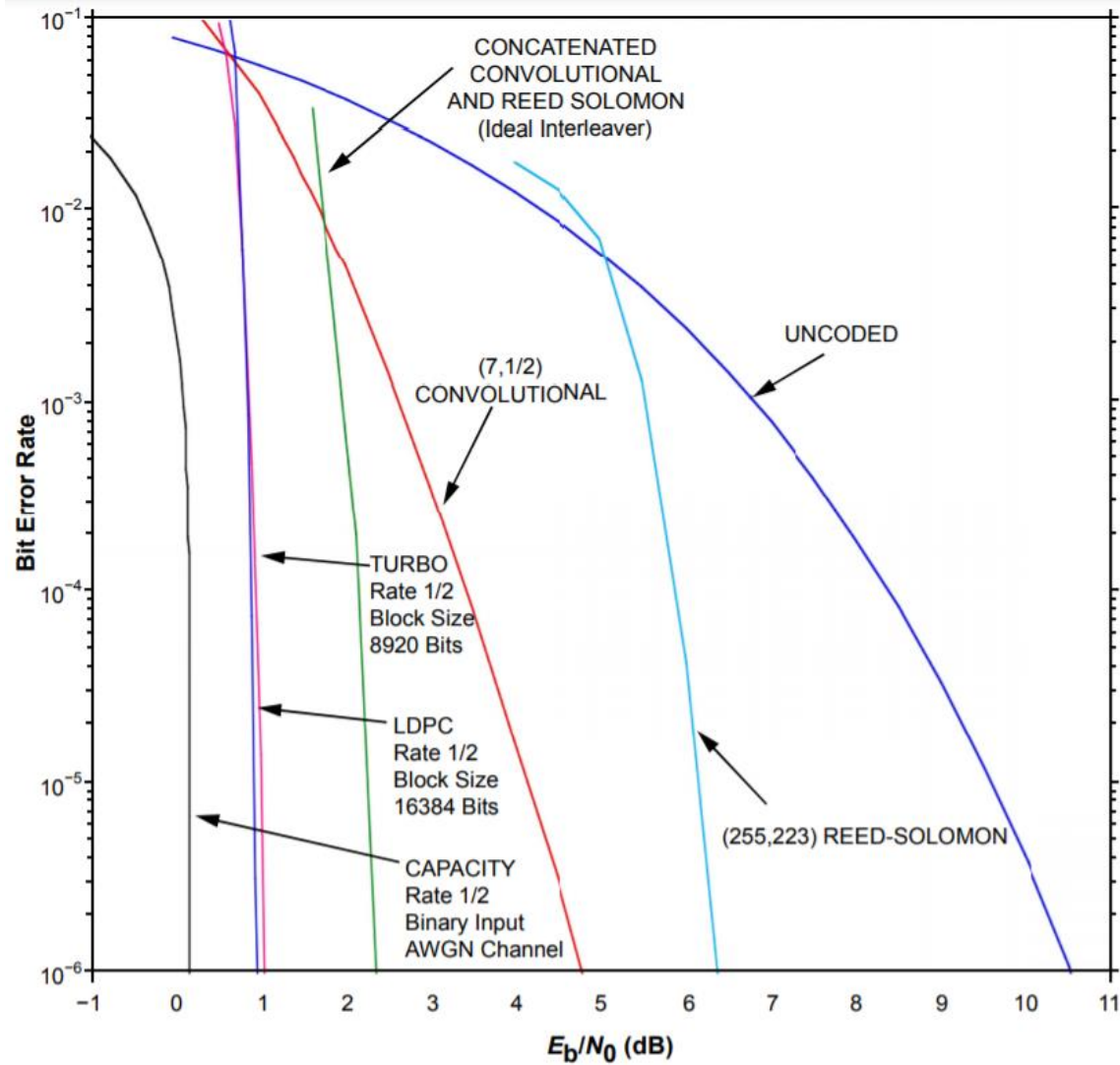


Figure 1. Telemetry Modulation Waveforms

CCSDS – кодирование



Типовые расчеты

Table 1. Capabilities of DSN 70-m and 34-m Antennas

Antenna Type	Complex/Site	DSS ID	Uplink Freq (MHz)	TXR Power (W)	EIRP (dBW)	Downlink Freq (MHz)	Gain (dBi) ¹ / G/T (dB/K)
34M BWG	Goldstone, CA USA	DSS 24	S: 2025 - 2120	20,000	78.7 - 98.7	S: 2200 - 2300	56.7 / 40.8
	Canberra, Australia	DSS 34	S: 2025 - 2120	20,000	78.7 - 98.7	S: 2200 - 2300	56.7 / 40.8
		DSS 36	S: 2025 - 2110	250	71.8 - 78.8	S: 2200 - 2300	56.7 / 40.8
	Madrid, Spain	DSS 54 ²	S: 2025 - 2120	20,000	78.7 - 98.7	S: 2200 - 2300	56.7 / 40.8
	Goldstone, CA USA	DSS 24, 25, 26	X: 7145 - 7235	20,000	89.5 - 109.5	X: 8400 - 8500	68.2 / 54.2
		DSS 26	X: 7145 - 7235	80,000	89.5 - 115.5	X: 8400 - 8500	68.2 / 54.2
	Canberra, Australia	DSS 34, 35, 36	X: 7145 - 7235	20,000	89.5 - 109.5	X: 8400 - 8500	68.2 / 54.2
34M HEF	Madrid, Spain	DSS 54, 55	X: 7145 - 7235	20,000	89.5 - 109.5	X: 8400 - 8500	68.2 / 54.2
	Goldstone, CA USA	DSS 15	S: 2025 - 2110	250	71.8 - 78.8	S: 2200 - 2300	56.0 / 39.4
	Madrid, Spain	DSS 65	S: 2025 - 2110	250	71.8 - 78.8	S: 2200 - 2300	56.0 / 39.4
	Goldstone, CA USA	DSS 15	X: 7145 - 7190	20,000	89.8 - 109.8	X: 8400 - 8500	68.3 / 53.2
70M	Madrid, Spain	DSS 65	X: 7145 - 7190	20,000	89.8 - 109.8	X: 8400 - 8500	68.3 / 53.2
	Goldstone, CA USA	DSS 14	S: 2110 - 2120	20,000	85.6 - 105.6	S: 2200 - 2300	63.5 / 49.8
	Canberra, Australia	DSS 43	S: 2110 - 2120	20,000	85.6 - 105.6	S: 2200 - 2300	63.5 / 49.8
				400,000 ³	106.7 - 118.7		
	Madrid, Spain	DSS 63 ²	S: 2110 - 2120	20,000	85.6 - 105.6	S: 2200 - 2300	63.5 / 49.8
	Goldstone, CA USA	DSS 14	X: 7145 - 7190	20,000	95.8 - 115.8	X: 8400 - 8500	74.5 / 61.5
	Canberra, Australia	DSS 43	X: 7145 - 7190	20,000	95.8 - 115.8	X: 8400 - 8500	74.6 / 61.5
70M	Madrid, Spain	DSS 63	X: 7145 - 7190	20,000	95.8 - 115.8	X: 8400 - 8500	74.6 / 61.5

Notes:

- 1) Referenced to 45-deg elevation, with 90% weather condition (CD=0.90), and diplexed configuration
- 2) S-band uplink in the Deep Space frequency range of 2110-2120 MHz is not available from MDSCC except for Voyager support by special agreement with the Spanish Frequency Spectrum Regulator
- 3) Operation above 100 kW requires special airspace coordination

Командная радиолиния

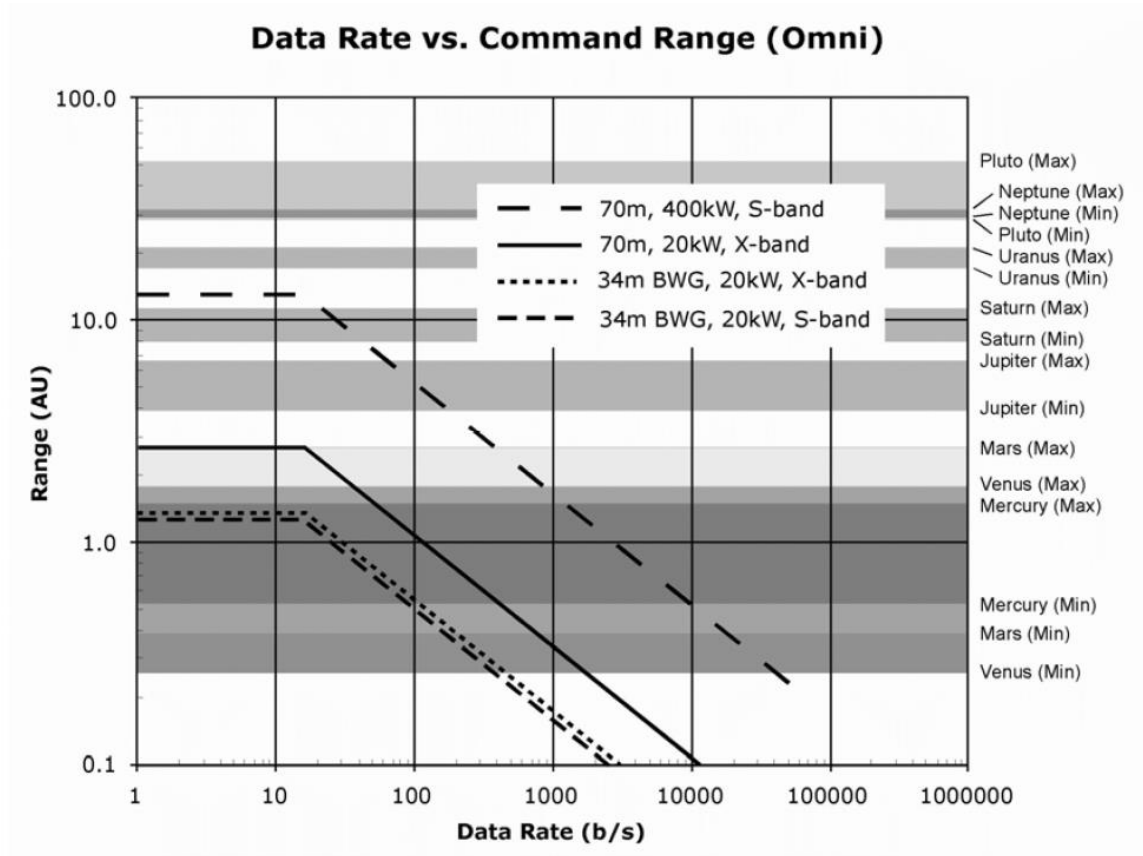


Figure 1. Maximum Command Range for a Reference Spacecraft with an Omni-directional Antenna and a 0.5 Radian Command Modulation Index.

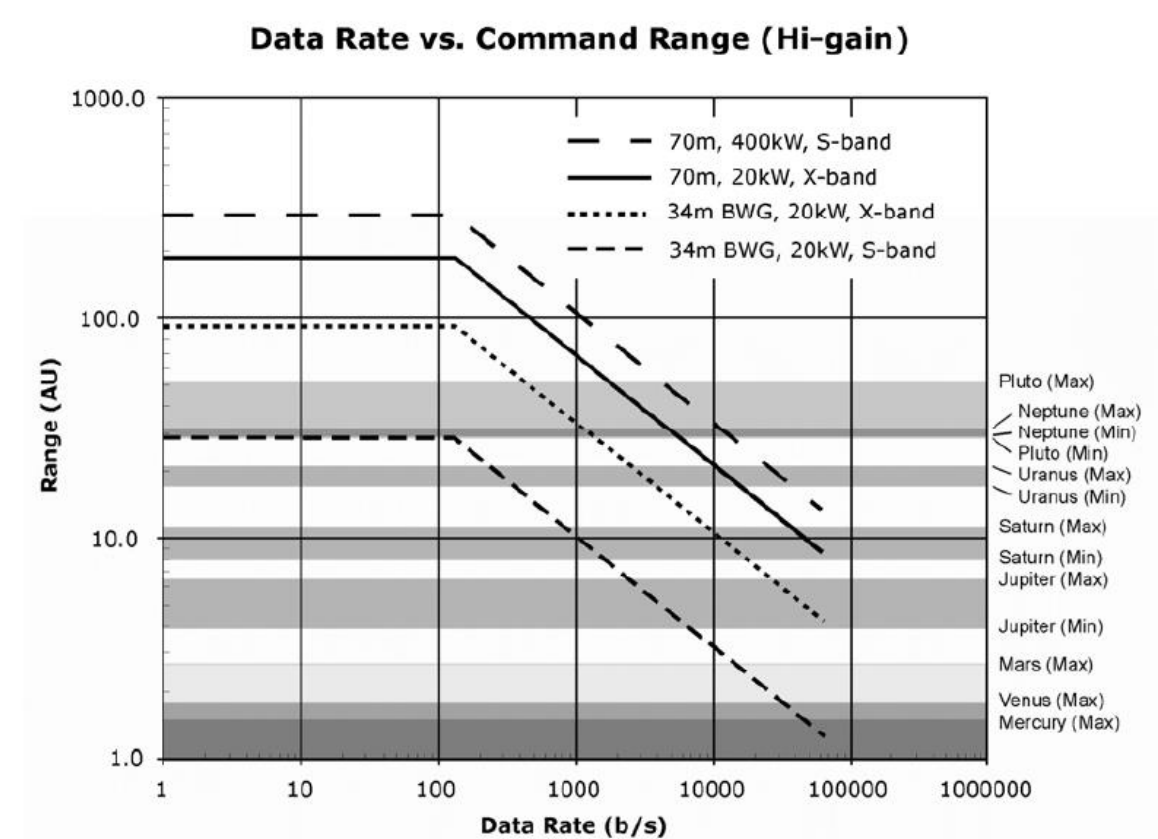


Figure 2. Maximum Command Range for a Reference Spacecraft with a High-gain Antenna and a 1.2 Radian Command Modulation Index.

Телеметрическая радиолиния

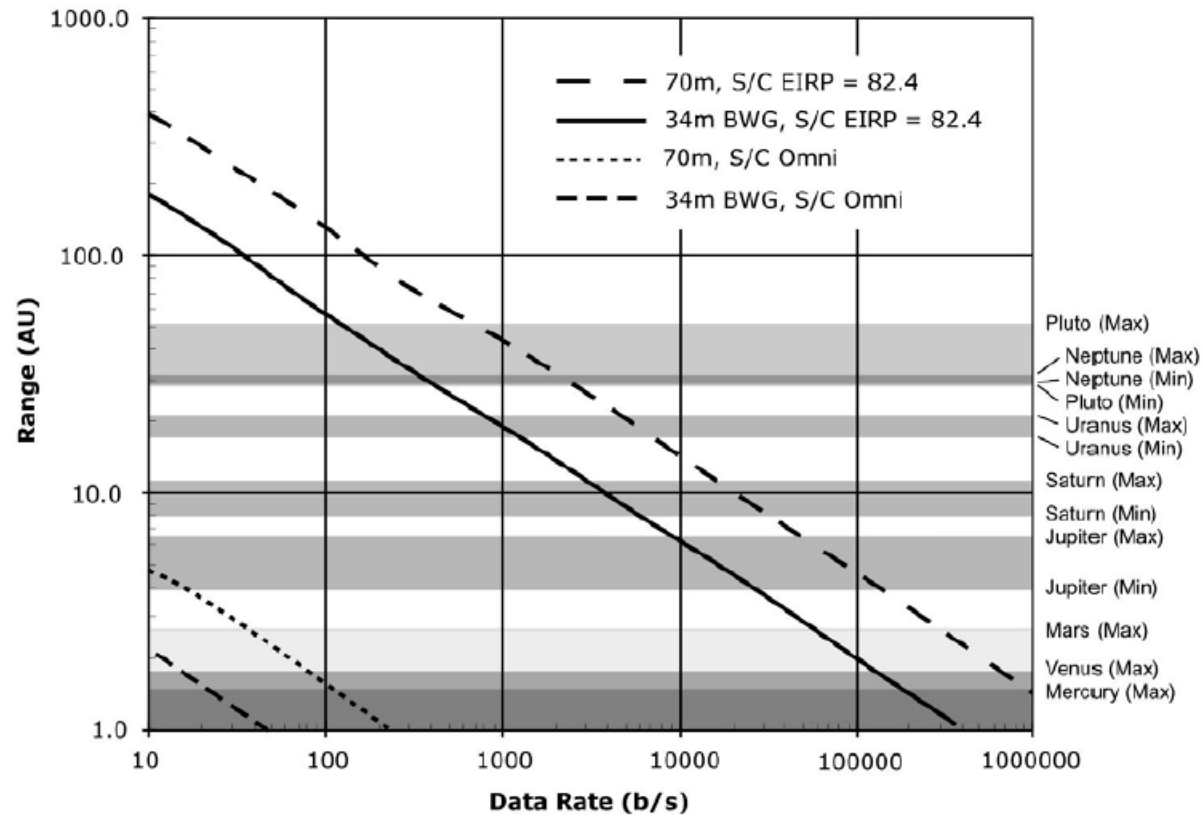


Figure 2. X-band Telemetry Performance with Reference Spacecraft

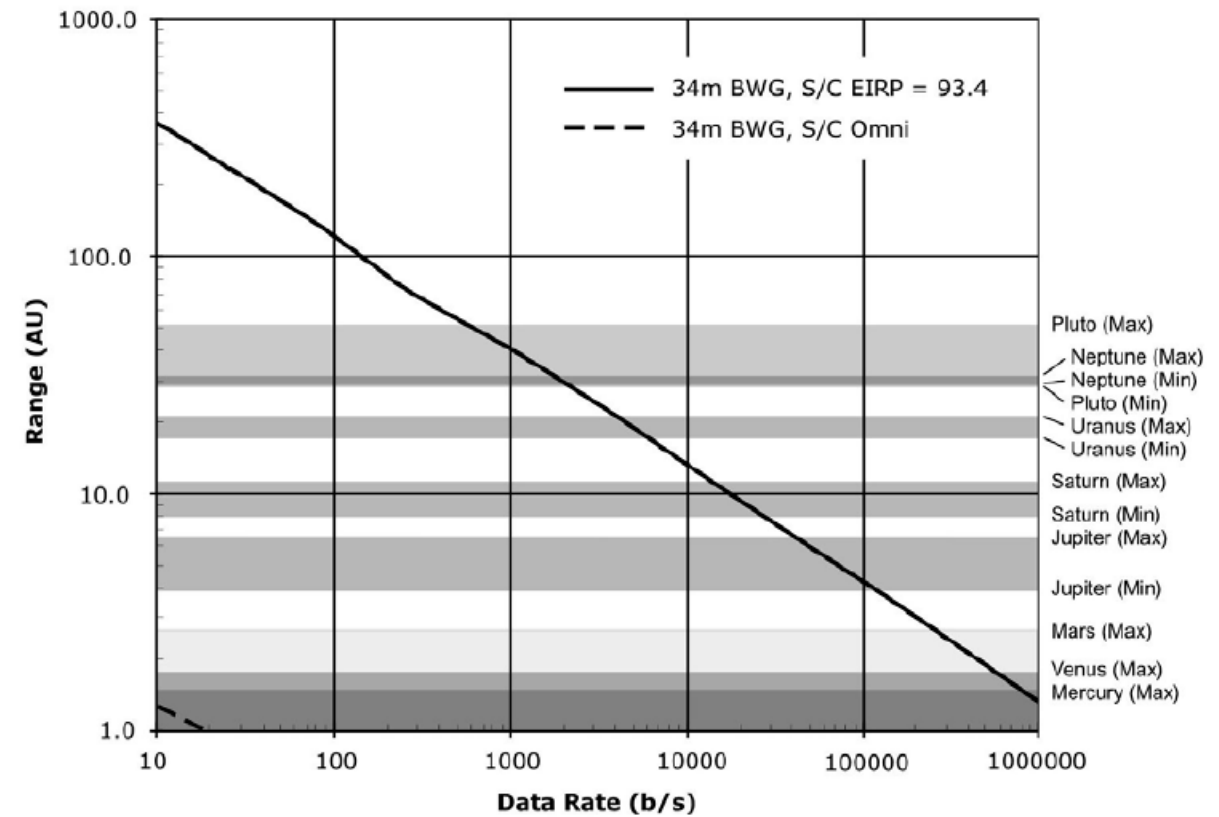


Figure 3. Ka-band Telemetry Performance with Reference Spacecraft

Параметры космических аппаратов

Table 2. Reference Spacecraft Characteristics for Figure 1 and Figure 2.

Parameter	Value
Antenna Gain less pointing loss	
Omnidirectional	0 dB
S-band Hi-gain	30 dB
X-band Hi-gain	39.7 dB
Other RF losses	-1.8 dB
System Temperature	500 K
Carrier Loop Bandwidth	100 Hz
Required Carrier Margin	12 dB
Command Detection Losses	-1.5 dB
Required E_b/N_0	9.6 dB

Параметры командной радиолинии

Table 6. Reference Spacecraft Characteristics

Parameter	X-band	Ka-band
Transmitter Power	35 W	35 W
Circuit Loses	2 dB	2 dB
Hi-gain Antenna (S/C HGA)	39 dB	50 dB
Pointing Loss (S/C HGA)	0.5 dB	1.5 dB
Coding	1784, $r=1/3$ Turbo	1784, $r=1/3$ Turbo
Weather	CD = 50	CD = 50
DSN Vacuum G/T	55.3 dB (34-m), 63.0 dB (70-m)	65.5 dB
Pointing Loss (DSN)	0.1 dB	0.1 dB
Margin	3 dB	3 dB

Параметры телеметрической радиолинии

Что еще?

1. Обеспечение электромагнитной совместимости (ДУ, научные приборы)
2. Учет влияния конструкции КА на характеристики ДН
3. Учет потерь в атмосфере планет (при посадке)
4. Учет шума других планет и Солнца (при передаче телеметрии)
5. Выбор оптимального кодера/декодера
6. Реализация приёмопередающих систем – ЛБВ VS полупроводники (X-диапазон реалистичен)
7. Реализация кабельных систем – волноводы VS коаксиальные кабели (X-диапазон реалистичен)

Спасибо за
внимание!
Вопросы?