

РЕЗУЛЬТАТЫ АСТРОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ РАДИОЛОКАЦИИ ВЕНЕРЫ В 1977 г.

*В. А. Котельников, Ю. Н. Александров, В. К. Головков, В. М. Дубровин,
А. Л. Зайцев, В. И. Каевитсер, А. А. Крымов, Ю. К. Наумкин, Г. М. Петров,
О. Н. Ржига, А. Ф. Хасянов, А. М. Шаховской*

Астронимический журнал. 1979. Том 56. Вып. 2

Представлены результаты измерений времени запаздывания и поправки на доплеровское смещение частоты (доплеровской поправки), полученные в Институте радиотехники и электроники АН СССР при радиолокационных наблюдениях Венеры в 1977 г. Показано, что фактические положения Венеры в 1977 г. оказались на 20–115 км ниже расчетных на интервале наблюдений.

The results of astrometric measurements obtained in the radar observations of Venus in 1977, by V. A. Kotel'nikov, Yu. N. Aleksandrov, V. K. Golovkov, V. M. Dubrovin, A. L. Zajtsev, V. I. Kaevitser, A. A. Krymov, Yu. K. Naumkin, G. M. Petrov, O. N. Rzhiga, A. F. Khasyanov, A. M. Shakhovskoj. — The results of measurements of the time delay and of the correction for the Doppler frequency shift (the Doppler correction), obtained by the Institute of radio engineering and electronics of the Academy of Sciences of the U.S.S.R. in the radar observations of Venus in 1977, are presented. The real positions of Venus at the time interval of observations are shown to be 20–115 km smaller than the calculated ones.

В настоящей статье представлены результаты радиолокационных наблюдений Венеры, выполненных в течение марта–мая 1977 г. Институтом радиотехники и электроники АН СССР совместно с рядом других организаций. Излучение зондирующих сигналов и прием отраженных сигналов осуществлялись одной и той же антенной на волне 39 см.

Цель этого эксперимента — измерение времени запаздывания отраженных сигналов и поправки на доплеровское смещение частоты (доплеровской поправки). Методика радиолокационных наблюдений аналогична использовавшейся ранее [1], за исключением процедуры компенсации прогнозируемого (расчетного) доплеровского смещения, полное значение которого в 1977 г. вводилось в частоту передатчика в соответствии с формулой (9) из [1]. Для этого использовался

Таблица 1. Время запаздывания при радиолокации Венеры в 1977 г.

Время излучения, UTC, час, мин	Измеренное время запаздывания, мксек	Средняя квадратичная ошибка, мксек	Время излучения, UTC, час, мин	Измеренное время запаздывания, мксек	Средняя квадратичная ошибка, мксек
1.03.1977			19.03.1977		
17 36	426 492 368	500	15 24	324 351 596	32
17 56	426 403 149	500	15 52	324 268 293	6
2.03.1977			20.03.1977		
16 14	420 282 913	31	08 56	321 138 188	3
17 26	419 964 567	16	09 12	321 089 192	3
17 48	419 867 472	16	09 28	321 040 340	3
18 08	419 779 249	16	09 44	320 991 644	3
3.03.1977			11 36	320 655 214	5
14 54	414 130 473	8	11 52	320 607 813	2
15 14	414 042 365	8	12 08	320 560 571	2
15 34	413 954 425	8	12 26	320 507 617	2
15 54	413 866 623	10	12 42	320 460 713	2
16 48	413 630 286	10	13 04	320 396 471	2
17 20	413 490 547	8	13 36	320 303 530	4
17 42	413 304 577	9	13 52	320 257 263	4
4.03.1977			14 08	320 211 130	4
14 00	407 934 999	10	14 24	320 165 120	4
14 28	407 812 546	6	14 40	320 119 224	2
14 43	407 725 317	6	14 56	320 073 443	2
15 08	407 638 277	6	15 12	320 027 763	2
15 26	407 560 090	6	15 28	319 982 173	2
15 44	407 482 035	6	21.03.1977		
16 10	407 369 491	6	14 30	315 975 667	3
5.03.1977			14 44	315 937 484	3
13 46	401 643 080	6	14 58	315 899 383	3
14 04	401 565 261	6	15 12	315 861 361	3
14 38	401 418 722	6	15 26	315 823 405	2
15 38	401 161 435	6	15 40	315 785 515	2
15 56	401 084 530	6	15 54	315 747 685	2
			16 08	315 709 906	2

Таблица 1 (продолжение)

Время излучения, UTC, час, мин	Измеренное время запаздывания, мксек	Средняя квадратичная ошибка, мксек	Время излучения, UTC, час, мин	Измеренное время запаздывания, мксек	Средняя квадратичная ошибка, мксек
			14 14	298 353 692	3
24.03.1977			27.03.1977		
14 46	304 669 822	3	08 42	296 145 636	3
15 02	304 633 554	3	08 58	296 114 067	3
15 16	304 601 895	3	09 12	296 086 579	3
15 30	304 570 205	2	09 26	296 059 205	2
15 44	304 538 759	2	09 40	296 031 954	2
16 00	304 502 782	2	09 54	296 004 858	2
25.03.1977			12 10	295 748 358	3
14 28	301 399 705	3	12 24	295 722 640	3
14 44	301 365 938	3	12 38	295 697 042	3
14 58	301 336 477	3	12 52	295 671 562	3
15 12	301 307 086	2	13 06	295 646 191	2
15 26	301 277 762	2	13 20	295 620 934	2
15 40	301 218 494	2	13 34	295 595 780	2
15 54	301 219 282	2	13 58	295 552 898	2
26.03.1977			29.03.1977		
08 56	299 003 265	3	14 48	290 591 063	3
09 10	298 973 300	3	15 02	290 571 009	4
09 24	298 943 454	3	15 16	290 552 226	3
09 38	298 913 735	3	15 30	290 532 894	3
09 52	298 884 144	3	2.04.1977		
11 22	298 697 036	2	12 18	284 238 999	4
11 36	298 668 416	2	12 32	284 229 700	3
11 52	298 635 863	2	12 40	284 220 508	4
12 06	298 607 519	2	13 00	284 211 432	3
12 20	298 579 296	2	13 14	284 202 458	4
12 36	298 547 189	2	13 28	284 193 580	3
12 50	298 519 223	2	13 44	284 183 553	3
13 04	298 491 374	2	13 58	284 174 875	3
13 18	298 463 634	2	14 12	284 166 278	3
13 32	298 435 998	3	14 26	284 157 764	4
13 46	298 408 467	3	14 40	284 149 308	3
14 00	298 381 035	3			

Таблица 1 (продолжение)

Время излучения, UTC, час, мин	Измеренное время запаздывания, мксек	Средняя квадратичная ошибка, мксек	Время излучения, UTC, час, мин	Измеренное время запаздывания, мксек	Средняя квадратичная ошибка, мксек
3.04.1977			13 10	325 348 043	2
08 48	283 430 525	4	13 28	325 407 876	2
09 04	283 420 984	10	13 44	325 461 117	2
09 18	283 412 778	4	24.04.1977		
09 32	283 404 711	4	09 10	284 166 278	3
09 46	283 396 779	2	09 38	329 323 274	3
12 00	283 327 718	2	09 56	329 383 955	5
12 14	283 321 183	2	11 22	329 676 348	2
12 28	283 314 767	2	11 38	329 731 153	2
12 42	283 308 463	2	11 54	329 786 064	2
12 56	283 302 267	2	12 10	329 841 080	2
13 10	283 296 183	4	12 26	329 896 184	2
13 24	283 290 185	4	12 42	329 951 368	3
13 54	283 277 661	4	13.05.1977		
6.04.1977			07 12	445 385 190	8
12 24	282 357 971	6	07 36	445 504 195	8
13 00	282 364 769	3	09 10	445 973 520	8
13 14	282 367 587	3	09 30	446 074 005	8
13 28	282 370 496	3	11 30	446 680 584	8
13 52	282 375 684	2	11 52	446 792 313	8
14 06	282 378 818	2	12 16	446 914 311	8
14 20	282 382 014	2	12 38	447 026 225	8
23.04.1977			24.05.1977		
08 36	324 453 472	8	09 18	527 855 925	8
09 10	324 562 209	8	09 40	527 975 238	8
09 46	324 678 157	3	11 40	528 629 207	8
11 56	325 102 967	3	12 04	528 760 451	8
12 12	325 155 801	3			

специализированный синтезатор сигналов с программным изменением частоты по закону полинома 3-й степени [2].

Время запаздывания отраженных сигналов измеряется временным интервалом от момента t_1 , когда радиоволны покинули антенну, до момента t_3 , когда они были приняты после отражения в момент t_2 от ближайшего к Земле участка поверхности Венеры.

Доплеровской поправкой является величина, добавляемая к номинальной частоте радиолокатора f_0 в момент излучения t_1 с таким

Таблица 2. Доплеровская поправка при радиолокации Венеры в 1977 г.

Время излучения, UTC, час, мин	Измеренная доплеровская поправка, Гц	Средняя квадратичная ошибка, Гц	Время излучения, UTC, час, мин	Измеренная доплеровская поправка, Гц	Средняя квадратичная ошибка, Гц
1.03.1977			14 38	-55 110,56	0,10
15 24	-57 635,18	0,24	15 38	-54 780,10	0,10
15 56	-57 478,31	0,24	15 56	-54 697,51	0,10
16 22	-57 370,20	0,24	19.03.1977		
2.03.1977			13 56	-38 667,86	0,10
15 48	-56 886,82	0,24	15 06	-38 264,91	0,10
16 14	-56 774,15	0,24	15 52	-38 068,13	0,05
17 26	-56 561,10	0,24	20.03.1977		
17 48	-56 527,01	0,24	08 36	-39 429,38	0,05
18 08	-56 509,06	0,24	08 56	-39 291,77	0,05
3.03.1977			09 12	-39 176,69	0,05
14 32	-56 634,26	0,12	09 28	-39 057,65	0,05
14 54	-56 500,07	0,12	09 44	-38 935,09	0,05
15 14	-56 386,73	0,12	11 18	-38 173,30	0,06
15 34	-56 282,37	0,12	11 36	-38 024,98	0,06
15 54	-56 187,64	0,12	11 52	-37 894,03	0,06
16 48	-55 985,27	0,12	12 08	-37 764,45	0,06
17 20	-55 904,98	0,12	12 26	-37 621,06	0,06
17 42	-55 867,78	0,12	12 42	-37 496,30	0,06
4.03.1977			13 04	-37 329,88	0,06
13 40	-56 263,70	0,10	13 20	-37 213,17	0,06
14 00	-56 121,66	0,10	13 36	-37 100,84	0,06
14 28	-55 940,16	0,10	13 52	-36 993,14	0,06
14 48	-55 816,69	0,10	14 08	-36 890,60	0,06
15 08	-55 701,30	0,10	14 24	-36 793,61	0,06
15 26	-55 605,03	0,10	15 12	-36 539,44	0,06
15 44	-55 516,39	0,10	15 28	-36 468,14	0,06
16 10	-55 403,02	0,10	15 44	-36 403,97	0,06
5.03.1977			21.03.1977		
13 46	-55 453,72	0,10	13 32	-35 347,93	0,06
14 04	-55 330,05	0,10	13 46	-35 252,86	0,06
			14 00	-35 161,64	0,12
			14 16	-35 062,65	0,06

Таблица 2 (продолжение)

Время излучения, UTC, час, мин	Измеренная доплеровская поправка, Гц	Средняя квадратичная ошибка, Гц	Время излучения, UTC, час, мин	Измеренная доплеровская поправка, Гц	Средняя квадратичная ошибка, Гц
14 30	-34 980,83	0,05	09 38	-27 138,64	0,05
14 44	-34 903,69	0,05	09 52	-27 021,01	0,05
14 58	-34 831,49	0,05	11 22	-26 250,23	0,05
15 12	-34 764,43	0,05	11 36	-26 131,95	0,05
15 26	-34 702,74	0,05	12 06	-25 883,92	0,05
15 40	-34 646,53	0,05	12 20	-25 771,47	0,05
15 54	-34 595,98	0,05	12 36	-25 646,15	0,05
16 08	-34 551,22	0,05	12 50	-25 539,63	0,05
			13 04	-25 436,38	0,05
	24.03.1977		13 18	-25 336,74	0,05
14 32	-29 155,57	0,06	13 32	-25 240,97	0,05
14 46	-29 082,13	0,05	13 46	-25 149,39	0,05
15 02	-29 004,64	0,05	14 00	-25 062,30	0,06
15 16	-28 942,60	0,05	14 14	-24 979,75	0,06
15 30	-28 886,12	0,05	14 28	-24 902,02	0,06
15 44	-28 835,38	0,05	14 44	-24 819,66	0,06
16 00	-28 784,53	0,05	14 58	-24 753,25	0,06
16 14	-28 746,33	0,06	15 26	-24 637,02	0,06
	25.03.1977			27.03.1977	
14 12	-27 169,43	0,12	08 28	-25 450,47	0,06
14 28	-27 078,96	0,05	08 42	-25 342,53	0,05
14 44	-26 995,15	0,05	08 58	-25 215,53	0,05
14 58	-26 927,40	0,05	09 12	-25 101,80	0,05
15 12	-26 865,12	0,05	09 26	-24 985,81	0,05
15 26	-26 808,43	0,05	09 40	-24 808,06	0,05
15 40	-26 757,45	0,05	09 54	-24 748,83	0,05
15 54	-26 712,33	0,05	11 00	-24 178,52	0,06
16 08	-26 673,08	0,12	11 14	-24 058,23	0,06
	26.03.1977		11 28	-23 938,86	0,06
08 14	-27 797,89	0,06	11 44	-23 804,30	0,06
08 28	-27 695,29	0,06	12 10	-23 590,90	0,05
08 42	-27 589,21	0,06	12 24	-23 479,38	0,05
08 56	-27 480,23	0,12	12 38	-23 370,67	0,05
09 10	-27 368,66	0,05	12 52	-23 265,10	0,05
09 24	-27 254,67	0,05	13 06	-23 162,96	0,05
			13 20	-23 064,60	0,05

Таблица 2 (продолжение)

Время излучения, UTC, час, мин	Измеренная доплеровская поправка, Гц	Средняя квадратичная ошибка, Гц	Время излучения, UTC, час, мин	Измеренная доплеровская поправка, Гц	Средняя квадратичная ошибка, Гц
13 34	-22 970,26	0,05	12 56	-5 620,69	0,04
13 58	-22 818,78	0,06	13 10	-5 527,47	0,04
			13 24	-5 438,92	0,04
	29.03.1977		13 54	-5 266,01	0,04
14 48	-17 830,98	0,06	13 28	-8 077,85	0,04
15 02	-17 770,76	0,06			
15 16	-17 716,28	0,06		6.04.1977	
15 30	-17 667,64	0,06	11 34	1 910,02	0,06
			11 50	2 037,49	0,06
	2.04.1977		12 06	2 160,48	0,06
11 34	-8 919,47	0,06	12 24	2 292,98	0,04
11 48	-8 803,75	0,06	13 00	2 536,58	0,04
12 18	-8 565,77	0,06	13 14	2 622,86	0,04
12 32	-8 459,94	0,06	13 28	2 704,12	0,04
12 46	-8 357,92	0,10	13 52	2 831,02	0,04
13 00	-8 260,15	0,04	14 06	2 897,57	0,04
13 14	-8 166,69	0,04	14 20	2 958,34	0,04
13 44	-7 982,30	0,04			
13 58	-7 904,13	0,04		23.04.1977	
14 12	-7 831,31	0,04	08 20	40 695,34	0,06
14 26	-7 763,99	0,04	08 36	40 831,53	0,06
14 40	-7 702,32	0,04	09 10	41 116,57	0,06
			09 30	41 279,61	0,06
	3.04.1977		09 46	41 406,80	0,06
07 56	-8 148,74	0,06	11 38	42 170,82	0,06
08 12	-8 047,58	0,06	11 56	42 266,98	0,06
08 23	-7 882,95	0,06	12 12	42 345,04	0,06
08 48	-7 710,69	0,04	13 10	42 565,50	0,06
09 04	-7 570,24	0,04	13 28	42 613,00	0,06
09 18	-7 445,97	0,04	13 44	42 646,64	0,06
09 32	-7 320,70	0,04			
09 46	-7 194,90	0,04		24.04.1977	
11 46	-6 147,42	0,06	08 52	42 745,17	0,06
12 00	-6 034,97	0,04	09 10	42 893,65	0,06
12 14	-5 925,75	0,04	09 38	43 118,06	0,06
12 28	-5 820,12	0,04	09 56	43 256,97	0,06
12 42	-5 718,32	0,04	11 22	43 839,45	0,06

Таблица 2 (продолжение)

Время излучения, UTC, час, мин	Измеренная доплеровская поправка, Гц	Средняя квадратичная ошибка, Гц	Время излучения, UTC, час, мин	Измеренная доплеровская поправка, Гц	Средняя квадратичная ошибка, Гц
11 38	43 929,51	0,06	09 10	64 303,69	0,12
11 54	44 012,83	0,06	09 30	64 434,17	0,12
12 10	44 069,18	0,06	11 10	64 957,09	0,12
12 26	44 158,24	0,06	11 30	65 030,61	0,12
12 42	44 219,76	0,06	11 52	65 097,98	0,12
12 58	44 273,51	0,06	12 16	65 154,71	0,12
13 14	44 319,39	0,06	12 38	65 190,92	0,12
13 30	44 357,19	0,06			
13 46	44 386,88	0,06		24.05.1977	
	13.05.1977		09 18	69 417,58	0,12
			09 40	69 545,45	0,12
06 44	63 216,46	0,12	11 40	70 034,84	0,12
07 12	63 433,22	0,12	12 04	70 083,41	0,12
07 36	63 618,58	0,12			

расчетом, чтобы в момент приема t_3 отраженный сигнал имел номинальную частоту f_0 .

Результаты измерений времени запаздывания отраженных сигналов приведены в табл. 1. В первом столбце указаны моменты излучения сигналов t_1 , совпадающие с целыми четными минутами Всемирного времени (UTC), во втором столбце — измеренные величины времени запаздывания сигналов. В последнем столбце таблицы приведены оценки случайных погрешностей измерений времени запаздывания. При наблюдениях Венеры вблизи нижнего соединения (расстояние около 40 млн км) среднеквадратичная ошибка составляла 2 мксек или 300 м по дальности.

В табл. 2 приведены результаты измерений доплеровской поправки частоты отраженных сигналов (второй столбец) в моменты излучения сигналов t_1 (первый столбец). Среднеквадратичная ошибка измерений (третий столбец) была заключена в пределах 0,04–0,12 Гц, что в пересчете на радиальную скорость Венеры составляло $\sim 0,8$ –2,3 см/сек.

Номинальное значение частоты радиолокатора $f_0 = 768\,719\,220$ Гц; астрономические координаты антенны радиолокатора [3]: северная широта $\varphi = 45^\circ 10'$, восточная долгота $\lambda = 33^\circ 15'$, чему соответствует $\rho \sin \varphi' = 0,70567$, $\rho \cos \varphi' = 0,70616$, где φ' — геоцентрическая широта, а ρ — геоцентрическое расстояние.

Расчетные значения времени запаздывания и доплеровской поправки вычислялись по таблицам, составленным в Институте теоретической астрономии АН СССР на основании аналитической теории Нью-

кома с учетом поправок Данкома к элементам орбит Венеры и Земли. При вычислениях были приняты следующие значения констант: скорость света $c = 299\,792\,459,0 \pm 0,8$ м/сек [4], астрономическая единица $a.e. = 149\,597\,879$ км¹⁾, радиус Венеры $R_V = 6050$ км.

Расчетные значения времени запаздывания и доплеровской поправки вводились в аппаратуру радиолокатора с точностью 1 мксек и 0,01 Гц соответственно. Отклонения измеренных значений этих величин от расчетных в зависимости от времени наблюдений в 1977 г. показаны на рис. 1 и 2. По оси абсцисс отложено время в сутках относительно нижнего соединения Венеры. На этих же рисунках приведены отклонения измеренных значений от расчетных и для нижних соединений Венеры в 1969, 1970, 1972 и 1975 гг. [3, 5].

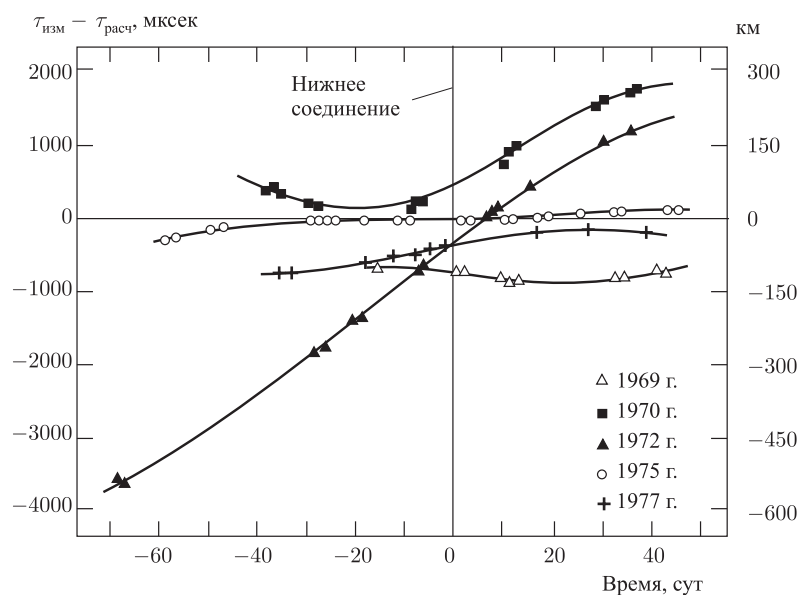


Рис. 1. Отклонения измеренных значений запаздывания отраженных Венерой сигналов от расчетных

В [5] уже отмечалось, что временные зависимости отклонений запаздывания от расчетных в разные нижние соединения имеют различный характер, а сами отклонения достигают 3500 мксек (500 км). В 1977 г. фактические положения Венеры оказались на 20–115 км ниже расчетных на интервале наблюдений.

Интересно сравнить данные измерений 1977 г. с измерениями 1969 г., поскольку они разделены интервалом в 8 лет — промежутком

¹⁾ В работах [3, 5] значение скорости света принималось равным $c = 299\,792,5$ км/сек, которому соответствует $a.e. = 149\,597\,900$ км.

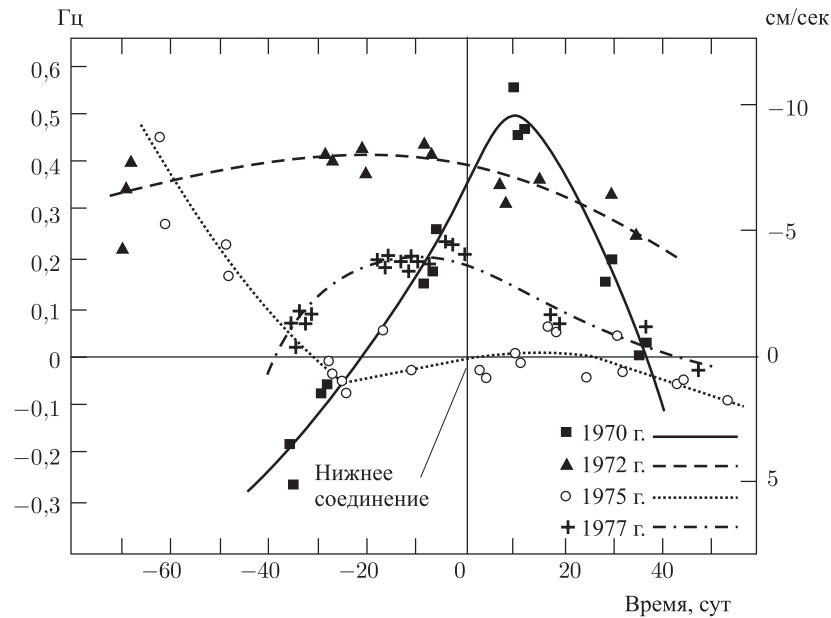


Рис. 2. Отклонения измеренных значений доплеровской поправки частоты отраженных Венерой сигналов от расчетных

времени, через который нижние соединения Венеры происходят в одних и тех же участках орбит Венеры и Земли. Знаки отклонений совпадают, но соответствующие кривые на рис. 1, близкие до соединений, затем расходятся почти на 100 км. Этот факт, по-видимому, можно объяснить недостаточно точным учетом влияния больших планет на орбиты Венеры и Земли.

Авторы выражают благодарность Р. А. Андрееву, С. М. Барабошкину, Н. Ф. Жуку, М. Т. Кравчуку, С. Ф. Лобзову, А. Г. Мелихову, В. М. Подольянюку, А. Т. Тагаевскому, Ю. В. Филину.

Институт радиотехники
и электроники Академии наук СССР

Поступила в редакцию 27 апреля
1978 г.

Литература

1. Ю. Н. Александров и др., *Астрон. ж.*, 49, 175, 1972.
2. Г. М. Петров, С. М. Барабошкин, А. Л. Зайцев, *Устройство синтезирования сигналов с программным изменением частоты*, Авторск. свид. № 596954, МКИ G06G 15/34, *Бюл. изобр.*, № 9, стр. 197, 1978.
3. В. А. Котельников и др., *Астрон. ж.*, 50, 836, 1973.
4. T. G. Blaney et al., *Nature*, 251, 46, 1974.
5. В. А. Котельников и др., *Астрон. ж.*, 53, 1270, 1976.